



**ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ
ΣΧΟΛΗ ΓΕΩΠΟΝΙΚΩΝ ΕΠΙΣΤΗΜΩΝ
ΤΜΗΜΑ ΓΕΩΠΟΝΙΑΣ ΙΧΘΥΟΛΟΓΙΑΣ
ΚΑΙ ΥΔΑΤΙΝΟΥ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ**



ΠΡΟΠΤΥΧΙΑΚΗ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΔΙΑΤΡΙΒΗ

**Διερεύνηση μεθόδων και μοντέλων προσδιορισμού
της εξατμισοδιαπνοής στη διαχείριση του νερού άρδευσης**

Κωνσταντίνος Πολίτης

ΒΟΛΟΣ, 2017

**<< Διερεύνηση μεθόδων και μοντέλων προσδιορισμού
της εξατμισοδιαπνοής στη διαχείριση του νερού άρδευσης >>**

Διμελής Εξεταστική Επιτροπή:

1) Ψιλοβίκος Άρης, Αναπληρωτής Καθηγητής, Αειφορική Διαχείριση Υδατικών Πόρων, Τμήμα Γεωπονίας Ιχθυολογίας και Υδάτινου Περιβάλλοντος, Σχολή Γεωπονικών Επιστημών, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας, *Επιβλέπων*.

2) Δομενικιώτης Χρήστος, Εργαστηριακό Διδακτικό Προσωπικό, Τηλεπισκόπηση και Γεωγραφικά Συστήματα Πληροφοριών, Τμήμα Γεωπονίας Ιχθυολογίας και Υδάτινου Περιβάλλοντος, Σχολή Γεωπονικών Επιστημών, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας, *Μέλος*.

*Η προπτυχιακή αυτή διατριβή
είναι αφιερωμένη
στον αγαπημένο μου παππού*

Περιεχόμενα

Περιεχόμενα.....	5
Ευχαριστίες.....	7
Περίληψη.....	8
1. Εισαγωγή	9
2. ET _o Calculator.....	11
2.1 Γενικά για το ET _o Calculator.....	11
2.2 Ιεραρχική δομή των μενού	12
2.3 Κεντρικό μενού.....	12
2.4 Διαχείριση βάσης δεδομένων	13
2.5 Εισαγωγή κλιματικών δεδομένων από αρχεία κειμένου	14
2.6 Πληροφορίες σχετικά με τον επιλεγμένο κλιματικό σταθμό	16
2.7 Μετεωρολογικά δεδομένα και υπολογισμός ETo	17
2.8 Εξατμισοδιαπνοή Αναφοράς (FAO-Monteith)	21
2.9 Διαδικασία Εξατμισοδιαπνοής αναφοράς (ET _o).....	22
3. Aquacrop	24
3.1 Το περιβάλλον του Aquacrop.....	24
3.2 Κεντρικό μενού.....	27
3.3 Προεπιλεγμένες ρυθμίσεις στην έναρξη.....	28
3.4 Επιλογή αρχείων εισόδου και αναίρεση επιλογής	28
3.5 Εμφάνιση και Ενημέρωση χαρακτηριστικών εισόδου	29
3.6 Δημιουργία αρχείων εισόδου	30
3.7 Έξοδος και κλείσιμο μενού	34
3.8 Κλιματικά δεδομένα.....	35
3.9 Χαρακτηριστικά καλλιέργειας.....	37
3.10 Ημερολόγιο	38
3.11 Έναρξη καλλιεργητικού κύκλου	39

3.12 Διαχείριση Άρδευσης	41
3.13 Χαρακτηριστικά Εδαφικού προφίλ	45
3.14 Αρχική περιεκτικότητα σε νερό του εδάφους.....	48
3.15 Αξιολόγηση αποτελεσμάτων προσομοίωσης	49
3.16 Στατιστικοί δείκτες	52
4. Συγκρίσεις στις μεθόδους υπολογισμού της Εξατμισοδιαπνοής	56
4.1 Εξατμισοδιαπνοή (ET)	57
4.2 Δυνητική Εξατμισοδιαπνοή (ET_p)	59
4.3 Εξατμισοδιαπνοή Αναφοράς.....	69
4.4 Εξατμισοδιαπνοή Καλλιέργειας (ETc)	70
4.5 Πραγματική Εξατμισοδιαπνοή (ETa)	70
5. Εφαρμογή	72
6. Αποτελέσματα-Συζήτηση	76
7. Συμπεράσματα	83
Βιβλιογραφία.....	85
Abstract	89

Ευχαριστίες

Θα ήθελα να εκφράσω τις ειλικρινείς μου ευχαριστίες σε όλους όσους συνέβαλαν στο να φέρω εις πέρας την παρούσα Προπτυχιακή Διπλωματική Διατριβή. Ιδιαίτερα θα ήθελα να ευχαριστήσω τον Επιβλέποντα Αναπληρωτή Καθηγητή της διατριβής αυτής κ.Ψιλοβίκο Άρη για την πολύτιμη καθοδήγηση του, τη διαρκή υποστήριξη του και τις ουσιώδεις συμβουλές του για τη συγγραφή της παρούσας εργασίας.

Επιπλέον, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον κ. Δομενικιώτη Χρήστο, Εργαστηριακό Διδακτικό Προσωπικό και μέλος της εξεταστικής μου επιτροπής για τις χρήσιμες συμβουλές του και τη καθοδήγηση του καθ'όλα τα στάδια διεκπεραίωσης της εργασίας.

Ακόμη, θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά την υποψήφια διδάκτορα κα Καραμούτσου Λίνα για την εμπιστοσύνη και την αφιέρωση του πολύτιμου χρόνου της, η οποία με τα πλούσια πνευματικά της προσόντα συνέβαλε ουσιαστικά στην περάτωση αυτής της διατριβής.

Τέλος, θα ήθελα να εκφράσω τις ευχαριστίες μου και την απέραντη ευγνωμοσύνη μου στην οικογένειά μου και στους θείους μου Δημήτρη και Γιώργο, για την κατανόηση και τη στήριξη τους καθ'όλο το χρονικό διάστημα σπουδών μου.

Περίληψη

Σκοπός της παρούσας προπτυχιακής διατριβής είναι η εξοικείωση και η κατανόηση των μοντέλων εξατμισοδιαπνοής (ET_o Calculator) με κύριο στόχο την αύξηση της παραγωγικότητας μιας καλλιέργειας, μέσω της βέλτιστης διαχείρισης των συστημάτων άρδευσης. Τα αποτελέσματα του πρόγραμματος αυτού χρησιμοποιήθηκαν ως δεδομένα εισόδου στο πρόγραμμα Aquacrop το οποίο προσομοιώνει την απόκριση απόδοσης ποωδών, κηπευτικών και λαχανοκομικών καλλιεργειών στο νερό και είναι ιδιαίτερα κατάλληλο για συνθήκες στις οποίες το νερό είναι βασικός περιοριστικός παράγοντας στην καλλιέργεια. Έτσι στο δεύτερο μέρος της παρούσας εργασίας, βασιζόμενο στα αποτελέσματα του ET_o Calculator και σε διάφορες βιοφυσικές διεργασίες, παρουσιάζεται μια ακριβής προσομοίωση της απόκρισης της καλλιέργειας στο σύστημα φυτών-εδάφους καθώς και στη διαχείριση αρδευτικών συστημάτων. Στο λογισμικό Aquacrop χρησιμοποιήθηκαν τέσσερα σενάρια σχετικά με τις μεθόδους άρδευσης περιλαμβάνοντας τη μέθοδο με στάγδην άρδευση (Drip irrigation) και τη μέθοδο με εκτοξευτήρες (Sprinkler irrigation) με τη χρήση ή όχι αναχωμάτων (soil bunds). Τέλος, έγινε σύγκριση στη μέθοδο Drip και Sprinkler χωρίς αναχώματα και με αναχώματα, στη μέθοδο Sprinkler με αναχώματα και χωρίς αναχώματα και στη μέθοδο Drip με αναχώματα και χωρίς αναχώματα για την επιλογή της κατάλληλης μεθόδου άρδευσης στη καλλιέργεια της τομάτας (*Solanum lycopersicum*). Τα αποτελέσματα έδειξαν την υπεροχή της μεθόδου με στάγδην άρδευση έναντι των άλλων αρδευτικών συστημάτων.

Λέξεις-κλειδιά Εξατμισοδιαπνοή, Aquacrop, ET_o calculator, αρδευτικά συστήματα, Στάγδην άρδευση, Άρδευση με εκτοξευτήρες

1. Εισαγωγή

Γενικά, με τον όρο εξατμισοδιαπνοή εννοούμε το συνδυασμό εξάτμισης του εδάφους και διαπνοής των καλλιεργειών. Οι παράμετροι καιρού, τα χαρακτηριστικά καλλιέργειας, και οι διαχειριστικές και περιβαλλοντικές πτυχές επηρεάζουν την εξατμισοδιαπνοή. Ο ρυθμός εξατμισοδιαπνοής συμβολίζεται με ET_o (FAO, 2012). Η έννοια της εξατμισοδιαπνοής εισάχθηκε για να μελετηθεί η απαιτούμενη εξάτμιση στην ατμόσφαιρα ανεξάρτητα από το τύπο καλλιέργειας που χρησιμοποιείται, την ανάπτυξη της καλλιέργειας και τις διαχειριστικές πρακτικές. Όπως το νερό είναι άφθονα διαθέσιμο στην επιφάνεια που γίνεται η εξατμισοδιαπνοή, οι παράγοντες του εδάφους δεν επηρεάζουν την Εξατμισοδιαπνοή αναφοράς (ET_o). Οι τιμές της Εξατμισοδιαπνοής αναφοράς (ET_o) μετρώνται ή υπολογίζονται σε διαφορετικές τοποθεσίες ή σε διαφορετικές περιόδους, είναι συγκρίσιμες διότι αφορούν την εξατμισοδιαπνοή από την ίδια επιφάνεια αναφοράς. Κατά συνέπεια, η Εξατμισοδιαπνοή αναφοράς (ET_o) είναι κλιματική παράμετρος και μπορεί να υπολογιστεί από τα δεδομένα καιρού. Εκφράζει τη δύναμη εξάτμισης στην ατμόσφαιρα σε μια συγκεκριμένη τοποθεσία και χρονική περίοδο και όχι τα χαρακτηριστικά της καλλιέργειας και τους παράγοντες του εδάφους (FAO, 2012).

Το πρόγραμμα υπολογισμού της εξατμισοδιαπνοής αναφοράς (ET_o Calculator) που χρησιμοποιήθηκε στην παρούσα εργασία στηρίζεται στην εξίσωση Penman-Monteith. Η σχετική ακρίβεια και σταθερή απόδοση του Penman-Monteith σε άγονα και υγρά κλίματα ενδείκνυται σε ευρωπαϊκές μελέτες. Η Εξατμισοδιαπνοή αναφοράς (ET_o) αντιπροσωπεύει ένα δείκτη των κλιματικών απαιτήσεων. Υπάρχουν δύο καλλιέργειες αναφοράς:

A) ET_o για μια χαμηλή καλλιέργεια με ύψος 0,12 m (ίδια με κουρεμένο γρασίδι)

B) ET_r για μια υψηλή καλλιέργεια με ύψος 0,50 m (μηδική) (Σημειώσεις Διαχείρισης Υδατικών Πόρων, Αλεξανδρής Σ.).

Η εξατμισοδιαπνοή του νερού στο φυσικό περιβάλλον είτε από ελεύθερες υδάτινες επιφάνειες, είτε από γυμνές ή φυτοκαλυμμένες επιφάνειες της γης, είναι από τις σημαντικότερες συνιστώσες του υδρολογικού κύκλου. Μια άλλη έννοια ευρύτατα χρησιμοποιούμενη στη μελέτη της εξάτμισης και της εξατμισοδιαπνοής, είναι και αυτή της δυνητικής εξατμισοδιαπνοής, η οποία είναι «ο μέγιστος ρυθμός εξατμισοδιαπνοής από μια φυτοκαλυμμένη επιφάνεια, που έχει επάρκεια νερού, κάτω από ορισμένες μετεωρολογικές συνθήκες» (Σημειώσεις Αειφορικής Διαχείρισης Υδατικών Πόρων, Ψιλοβίκος Α., 2005). Εξαρτάται από τα χαρακτηριστικά των φυτών και εδάφους, τη διαθέσιμη ενέργεια και τις συνθήκες της ατμόσφαιρας. Χρησιμοποιείται για το σχεδιασμό

συστημάτων άρδευσης, το προγραμματισμό άρδευσης, στραγγίσεις και για υδρολογικές μελέτες. Η εξατμισοδιαπνοή μπορεί να μετρηθεί άμεσα με: α) δεξαμενές β) λυσίμετρα και γ) με τη χρήση αγροτεμαχίων. Όσον αφορά, την έμμεση μέτρηση της επιτυγχάνεται με μεθόδους υδατικού ισοζυγίου και με μεθόδους προσδιορισμού της δυνητικής εξατμισοδιαπνοής από μετεο-κλιματικά δεδομένα (Σημειώσεις Εργαστήριο Υδρολογίας και Ανάλυσης Υδατικών Συστημάτων, Λουκάς Α.). Πέρα απ' αυτήν, η έννοια της Δυνητικής Εξατμισοδιαπνοής ορίζεται ως 'το ποσό του νερού που διαπνέεται και εξατμίζεται σε ένα δεδομένο χρόνο από μια χαμηλή πράσινη βλάστηση, η οποία καλύπτει εντελώς το έδαφος σε ομοιόμορφο ύψος από αναπτυσσόμενη χλωρίδα, σε συνθήκες απεριόριστου εδαφικού νερού' (Σημειώσεις Διαχείρισης Υδατικών Πόρων, Αλεξανδρής Σ.).

Σκοπός της παρούσας διατριβής είναι η εξοικείωση και η κατανόηση των μοντέλων εξατμισοδιαπνοής αναφοράς μέσω του προγράμματος ET₀ Calculator. Τα αποτελέσματα του προγράμματος αυτού χρησιμοποιήθηκαν ως δεδομένα εισόδου στο πρόγραμμα Aquacrop το οποίο προσομοιώνει την απόκριση απόδοσης ποωδών, κηπευτικών και λαχανοκομικών καλλιεργειών στο νερό και είναι ιδιαίτερα κατάλληλο για συνθήκες στις οποίες το νερό είναι βασικός περιοριστικός παράγοντας στην καλλιέργεια. Έτσι στο δεύτερο μέρος της παρούσας εργασίας βασιζόμενο στα αποτελέσματα του ET₀ Calculator και σε βιοφυσικές διεργασίες παρουσιάζεται μια ακριβής προσομοίωση της απόκρισης της καλλιέργειας στο σύστημα φυτών-εδάφους καθώς και στη διαχείριση αρδευτικών συστημάτων (FAO, 2012).

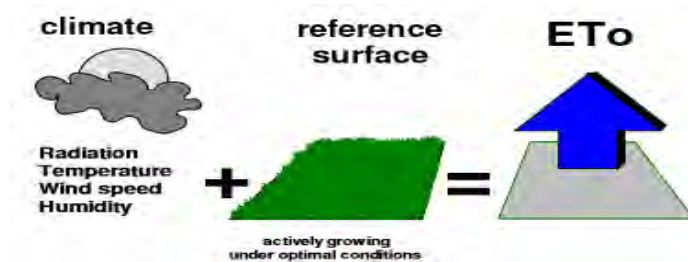
2. ET_o Calculator

2.1 Γενικά για το ET_o Calculator

Το ET_o calculator είναι ένα λογισμικό ανεπτυγμένο με κύριο σκοπό του να υπολογίσει την Εξατμισοδιαπνοή αναφοράς (ET_o) σύμφωνα με τα πρότυπα του FAO. Η Εξατμισοδιαπνοή αναφοράς (ET_o) αντιπροσωπεύει το ποσοστό εξατμισοδιαπνοής από μια πρότυπη επιφάνεια, όχι κοντά στο νερό. Ένα μεγάλο στρώμα γρασιδιού θεωρείται παγκοσμίως σαν μια πρότυπη επιφάνεια. Η καλλιέργεια αναφοράς καλύπτει εντελώς το έδαφος, διατηρείται κοντή, καλά ποτισμένη και αναπτύσσεται ενεργά υπό άριστες αγρονομικές συνθήκες. Ο ET_o calculator αξιολογεί την Εξατμισοδιαπνοή αναφοράς (ET_o) από μετεωρολογικά δεδομένα σύμφωνα με την εξίσωση του Penman-Monteith. Αυτή η μέθοδος έχει επιλεγεί από τον FAO σαν πρότυπη επειδή προσεγγίζει προσεκτικά την εξατμισοδιαπνοή αναφοράς του γρασιδιού στη τοποθεσία που αξιολογείται. Βασίζεται σε φυσικές και ενσωματώνεται τόσο σε φυσιολογικές όσο και σε αεροδυναμικές παραμέτρους. Το πρόγραμμα μπορεί να χειριστεί ημερήσια, 10-ήμερα και μηνιαία κλιματικά δεδομένα. Τα δεδομένα μπορούν να δοθούν σε μια ευρεία ποικιλία μονάδων και μπορούν να επεξεργαστούν τα δεδομένα που καθορίζονται στις συνήθεις κλιματικές παραμέτρους. Το ET_o calculator αποτελεί ένα πρακτικό εργαλείο που βοηθά τους αγρο-μετεωρολόγους, τους αγρονόμους και τους μηχανικούς άρδευσης να εκτελούν τυποποιημένους υπολογισμούς για την εξατμισοδιαπνοή αναφοράς (ET_o), το οποίο αργότερα θα χρησιμοποιηθεί στις μελέτες χρήσης των καλλιεργειών (FAO, 2012).

Αξίζει να τονιστεί πως οι μόνοι παράγοντες που επηρεάζουν την Εξατμισοδιαπνοή αναφοράς (ET_o) είναι οι κλιματικές παράμετροι. Κατά συνέπεια, η Εξατμισοδιαπνοή αναφοράς (ET_o) είναι κλιματική παράμετρος και μπορεί να υπολογιστεί από τα δεδομένα καιρού. Εκφράζει τη δύναμη εξάτμισης στην ατμόσφαιρα σε μια συγκεκριμένη τοποθεσία και χρονική περίοδο του χρόνου και όχι τα χαρακτηριστικά της καλλιέργειας και τους παράγοντες του εδάφους. Λόγω της δυσκολίας απόκτησης ακριβών μετρήσεων, η Εξατμισοδιαπνοή αναφοράς (ET_o), συνήθως υπολογίζεται από τα δεδομένα καιρού (FAO, 2012).

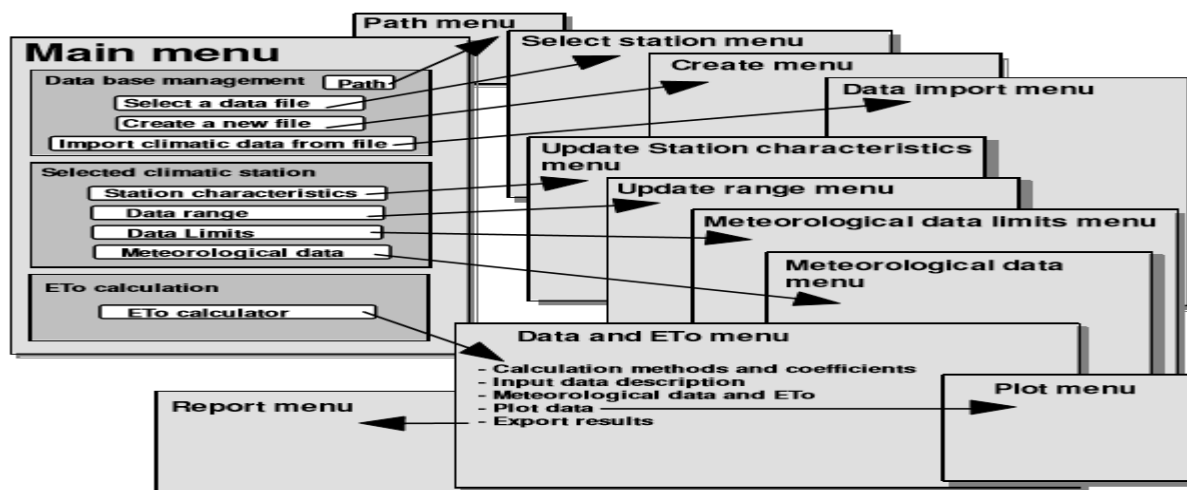
Ένας μεγάλος αριθμός εμπειρικών και ημι-εμπειρικών εξισώσεων έχουν αναπτυχθεί για την εκτίμηση της εξατμισοδιαπνοής από μετεωρολογικά δεδομένα. Πολυάριθμοι ερευνητές έχουν αναλύσει την απόδοση των διάφορων μεθόδων υπολογισμού για διαφορετικές τοποθεσίες. Ως αποτέλεσμα μια διαβούλευση εμπειρογνομώνων που διεξάχθηκε το Μάιο του 1990, η μέθοδος FAO-Penman-Monteith συνίσταται πλέον ως η πρότυπη μέθοδος για τον προσδιορισμό και τον υπολογισμό της Εξατμισοδιαπνοής αναφοράς (ET_o) (FAO, 2012).



Εικόνα 2.1: Εξατμισοδιαπνοή αναφοράς (ET_o) (<http1>)

2.2 Ιεραρχική δομή των μενού

Από το *Main menu* ο χρήστης έχει πρόσβαση σε ποικίλα μενού του προγράμματος. Η ιεραρχική δομή των μενού απεικονίζεται στην Εικόνα 2.2.



Εικόνα 2.2: Ιεραρχική δομή των μενού (<http2>)

2.3 Κεντρικό μενού

Το *Main menu* αποτελείται από τα εξής τμήματα:

- Διαχείριση βάσης δεδομένων στο οποίο:

-**The Path** (φάκελος όπου τα δεδομένα είναι αποθηκευμένα), μπορεί να αλλάξει

-Ο χρήστης μπορεί να επιλέξει ένα φάκελο δεδομένων ή να δημιουργήσει ένα καινούργιο φάκελο στον οποίο τα μετεωρολογικά δεδομένα από κλιματικούς σταθμούς είναι αποθηκευμένα

-Ο χρήστης μπορεί να εισάγει κλιματικά δεδομένα σε ένα φάκελο

- Επιλεγμένος κλιματικός σταθμός. Σε αυτό το τομέα το όνομα των επιλεγμένων φακέλων

και το όνομα των κλιματικών σταθμών και περιοχής εμφανίζονται. Ο χρήστης μπορεί να ενημερώσει τα **χαρακτηριστικά των κλιματικών σταθμών**, μπορεί να επεκτείνει ή να μειώσει το εύρος δεδομένων αλλάζοντας το **όριο δεδομένων** εξετάζοντας **μετεωρολογικά δεδομένα**.

2.4 Διαχείριση βάσης δεδομένων

Στη βάση διαχείρισης δεδομένων του *Main menu* τα πλέον υπάρχοντα αρχεία μπορούν να επιλεγθούν ενώ είναι εφικτό να δημιουργηθούν νέα.

- **Path**

Με τη βοήθεια του κουμπιού διαδρομής στο *Main menu*. Ο χρήστης μπορεί να συγκεκριμενοποιήσει το φάκελο όπου τα υπάρχοντα αρχεία μπορούν να ανακτηθούν ή και να αποθηκευτούν (FAO 2012).

- **Δημιουργία νέου αρχείου**

Στο *Create menu* (Εικ.2.4) ο χρήστης καθορίζει:

-Όνομα αρχείου

-Πληροφορίες του κλιματικού σταθμού (το όνομα και τη περιοχή κλιματικών σταθμών, το γεωγραφικό πλάτος (Βόρειο ή Νότιο), το γεωγραφικό μήκος (Ανατολικό ή Δυτικό), το υψόμετρο σε μέτρα γύρω από το επίπεδο της θάλασσας και περιγραφή της όποιας τοποθεσίας (η πληροφορία συνηθίζεται για να υπολογίζει τα χαμένα κλιματικά δεδομένα) (FAO 2012).

-Πληροφορία μετεωρολογικών δεδομένων (τύπος δεδομένων (ημερήσια, 10-ήμερα ή μηνιαία) και το εύρος χρόνου (από ημερομηνία σε ημερομηνία). Αν τα μετεωρολογικά δεδομένα αποτελούνται από τους μέσους μερικών χρόνων, τα δεδομένα δεν πρέπει να συνδέονται με ένα συγκεκριμένο χρόνο και ο χρόνος δε πρέπει να προσδιορίζεται (FAO, 2012).

- **Επιλογή δεδομένων φακέλου**

Στο *Select station menu* , ο χρήστης επιλέγει ένα φάκελο δεδομένων από μία λίστα. Η λίστα δείχνει τα ονόματα των προϋπάρχοντων φακέλων σε ένα προσδιορισμένο φάκελο (Path όπως προσδιορίζεται στο *Main menu*). Ο χρήστης μπορεί να προσδιορίσει τα χαρακτηριστικά των σταθμών από τα διαθέσιμα μετεωρολογικά δεδομένα συνδεδεμένα με ένα φάκελο δεδομένων (FAO, 2012).

2.5 Εισαγωγή κλιματικών δεδομένων από αρχεία κειμένου

Τα κλιματικά δεδομένα αποθηκεύονται σε φακέλους και μπορούν να εισαχθούν από το λογισμικό. Το πρόγραμμα μπορεί να χειριστεί ημερήσια, 10-ήμερα ή μηνιαία κλιματικά δεδομένα δημιουργημένα από το χρήστη του προγράμματος ή οι φάκελοι με μηνιαία δεδομένα μπορούν να εξαχθούν από το FaoClim 2.0 και το CLIMWAT 2.0 πρόγραμμα (FAO, 2012).

Τα **Data import menu** (Εικ.2.5.1) περιέχει 5 φύλλα πίνακα, όπου ο χρήστης προσδιορίζει:

- Το είδος του φακέλου:** το τύπο του φακέλου που χρειάζεται να εισαχθεί. Γίνεται διάκριση μεταξύ:
 - Αρχεία κειμένου ελεύθερης μορφής (αρχεία με επέκταση **CXT**);
 - FAO Clim 2 φάκελοι (αρχεία με επέκταση **DAT**);
 - CLIMWAT files (αρχεία με επέκταση **PEN**)
- Κλιματικός σταθμός:**τα χαρακτηριστικά του κλιματικού σταθμού
- Μετεωρολογικά δεδομένα:**ο τύπος μετεωρολογικών δεδομένων και το εύρος χρόνου (από-σε);
- Κλιματικές παράμετροι**

Κλιματικός σταθμός

Ο χρήστης προσδιορίζει:

- Το όνομα και τη περιοχή του κλιματικού σταθμού
- Το γεωγραφικό μήκος (Ανατολή ή Δύση)
- Το γεωγραφικό πλάτος (Βορράς ή Νότος)
- Το υψόμετρο σε μέτρα επάνω από την επιφάνεια της θάλασσας
- Περιγραφή της κάθε τοποθεσίας (Οι πληροφορίες αυτές χρησιμοποιούνται για την εκτίμηση κλιματικών δεδομένων που λείπουν).

Μετεωρολογικά δεδομένα

Ο χρήστης προσδιορίζει:

-το είδος των δεδομένων (ημερήσια,10-ήμερα,μηνιαία)

-εύρος χρόνου (από ημερομηνία σε ημερομηνία). Αν τα μετεωρολογικά δεδομένα αποτελούνται από τους μέσους μερικών χρόνων, τα δεδομένα δεν πρέπει να σχετίζονται με ένα συγκεκριμένο χρόνο και ο χρόνος δεν πρέπει να προσδιοριστεί (FAO, 2012).

Μόλις το εύρος χρόνου ρυθμιστεί, το πρόγραμμα εμφανίζει τον αντίστοιχο αριθμό δεδομένων σε αυτό το εύρος. Ο αριθμός των εγγραφών θα πρέπει να ταιριάζει με τον αριθμό των γραμμών του αρχείου κειμένου που περιέχει τα μετεωρολογικά δεδομένα (FAO, 2012).

Κλιματικές παράμετροι

Πατώντας στο κελί όπου ο κωδικός των κλιματικών παραμέτρων πρέπει να προσδιοριστεί, εμφανίζεται μια λίστα που περιέχει τον κώδικα για τις διάφορες κλιματικές παραμέτρους που το πρόγραμμα μπορεί να χειριστεί. Οι κωδικοί αποθηκεύονται σε 4 φακέλους και περιλαμβάνουν τους κωδικούς θερμοκρασίας, κωδικούς υγρασίας, κωδικούς ταχύτητας ανέμου και κωδικούς ηλιοφάνειας και ακτινοβολίας. Όταν ένας κωδικός είναι επιλεγμένος από μια λίστα για μια συγκεκριμένη κλιματική παράμετρο, το πρόγραμμα εμφανίζει:

-το σύμβολο και τη μονάδα επιλεγμένων κλιματικών παραμέτρων

-την ελάχιστη και μέγιστη αξία για τις επιλεγμένες κλιματικές παραμέτρους

-το ελάχιστο και μέγιστο όριο με τις επιλεγμένες κλιματικές παραμέτρους που χρησιμοποιούνται από το πρόγραμμα

Αν τα όρια του προγράμματος είναι μικρότερα από τα δεδομένα τότε παρουσιάζεται σφάλμα. Αν ο χρήστης πιστεύει ότι τα όρια του προγράμματος είναι πολύ μικρά τότε μπορεί να μεταβάλλει τα όρια πατώντας <Update Data Range> (FAO, 2012).

Αν δεν υπάρχουν σφάλματα τότε ο χρήστης προσδιορίζει το όνομα του φακέλου ο οποίος περιέχει χαρακτηριστικά του σταθμού και τα κλιματικά δεδομένα, τα δεδομένα είναι αποθηκευμένα στη βάση δεδομένων του προγράμματος επιλέγοντας την <Εισαγωγή> (FAO, 2012).

2.6 Πληροφορίες σχετικά με τον επιλεγμένο κλιματικό σταθμό

Όταν έχει δημιουργηθεί ένας φάκελος ή επιλεγθεί από τη βάση δεδομένων ή από τα κλιματικά δεδομένα τα οποία έχουν εισαχθεί, το όνομα του φακέλου και το όνομα του κλιματικού σταθμού και της περιοχής εμφανίζονται. Ο χρήστης μπορεί να εμφανίζει στοιχεία διαθέσιμων μετεωρολογικών δεδομένων και να εξετάζει τα χαρακτηριστικά του σταθμού, να επεκτείνει ή να συρρικνώσει το εύρος δεδομένων και να μεταβάλλει τα όρια της βάσης δεδομένων (FAO, 2012).

Μετεωρολογικά δεδομένα

Στο *Meteorological data menu*, πληροφορίες σχετικά με τα διαθέσιμα μετεωρολογικά δεδομένα εμφανίζονται: η ελάχιστη και η μέγιστη τιμή, ο αριθμός των διαθέσιμων αρχείων για καθεμία από τις προϋπάρχουσες παραμέτρους. Στο 'Plot meteorological data', οι τιμές καθ'όλη τη διάρκεια του χρόνου ποικίλλουν για καθεμία από τις κλιματικές παραμέτρους (FAO, 2012).

Χαρακτηριστικά σταθμού

Στο *Update Station characteristics menu*, το όνομα, η περιοχή, το υψόμετρο και οι συντεταγμένες του κλιματικού σταθμού εμφανίζονται όπως και η περιγραφή της τοποθεσίας. Ο χρήστης μπορεί να εκσυγχρονίζει τις απεικονιζόμενες πληροφορίες (FAO, 2012).

Εύρος δεδομένων

Στο *Update range menu*, ο τύπος μετεωρολογικών δεδομένων (ημερήσια, 10-ήμερα ή μηνιαία) και ο χρόνος εύρους (από-σε) εμφανίζονται. Ο χρήστης μπορεί να επεκτείνει ή να συρρικνώσει το εύρος. Όταν το φάσμα δεδομένων έχει επεκταθεί, τα επιπλέον δεδομένα μπορούν να προσδιοριστούν στο *Data and ET_o menu* (FAO, 2012).

- **Όρια δεδομένων**

Ο προσδιορισμός ανώτερων και κατώτερων ορίων για τα μετεωρολογικά δεδομένα γίνεται στο *Meteorological data limits menu* (Εικ.2.6), μόνο δεδομένα με συγκεκριμένο εύρος είναι αποδεκτά κατά την εισαγωγή δεδομένων στο *Data and ET_o menu* ή όταν γίνεται εισαγωγή δεδομένων από ένα αρχείο κειμένου. Αν έχουν ρυθμιστεί σωστά τα όρια τότε το πρόγραμμα παρέχει έναν έλεγχο στα δεδομένα. Αφού τα όρια δεδομένων είναι μέρος της περιγραφής του σταθμού, τότε τα όρια είναι βάσιμα για τη περιοχή η οποία μπορεί να προσδιοριστεί για καθένα κλιματικό σταθμό ατομικά (FAO, 2012).

Τα συγκεκριμένα όρια για τα κλιματικά δεδομένα δεν μπορούν ποτέ να υπερβούν, οι περιορισμοί είναι χτισμένοι για τα ανώτερα και κατώτερα όρια.

- Όρια για τη θερμοκρασία του αέρα, σχετική υγρασία και πίεση εξάτμισης είναι συσχετισμένα. Αλλάζοντας τα όρια για μία παράμετρο θα μεταβληθούν τα όρια για τις συσχετισμένες κλιματικές παραμέτρους (FAO, 2012).

- Κατώτερο όριο

$$e_a \geq e^{\circ}(T_{\min}) \frac{RH_{\min}}{100}$$

- Ανώτερο όριο

$$e_a \leq e^{\circ}(T_{\max})$$

όπου:

e_a = η πραγματική πίεση ατμών (kPa)

$e^{\circ}(T_{\min})$ = κορεσμός πίεσης ατμών σε ημερήσια ελάχιστη θερμοκρασία (kPa)

$e^{\circ}(T_{\max})$ = κορεσμός πίεσης ατμών σε ημερήσια μέγιστη θερμοκρασία (kPa)

RH_{\min} = ελάχιστη σχετική υγρασία [%]

Το γεωγραφικό πλάτος του σταθμού και ο χρόνος, αποφασίζουν τις ώρες με τη περισσότερη ηλιοφάνεια (N) και την εξωγήινη ακτινοβολία (Ra). Αυτό βάζει ένα όριο στη μέγιστη τιμή που μπορεί να παρατηρηθεί σε μια συνηθισμένη ημέρα για τις ώρες πολλής ηλιοφάνειας (n), της ηλιακής ακτινοβολίας (Rs) και καθαρής ακτινοβολίας (Rn) (FAO, 2012).

2.7 Μετεωρολογικά δεδομένα και υπολογισμός ET_o

Όταν ένας φάκελος είναι δημιουργημένος ή επιλεγμένος στη διαχείριση βάσης δεδομένων ή κλιματικών δεδομένων και έχει εισαχθεί, ο χρήστης μπορεί να έχει πρόσβαση στο **Data and ET_o menu**. Στο μενού ο χρήστης μπορεί.

- να αλλάξει τη περιγραφή των δεδομένων εισόδου
- να προσδιορίσει ή να αναβαθμίσει τα μετεωρολογικά δεδομένα και το αντίστοιχο ET_o.
- δεδομένα οικοπέδου
- τα αποτελέσματα εξαγωγών

Μέθοδοι υπολογισμού

Η έννοια της εξατμισοδιαπνοής από τα μετεωρολογικά δεδομένα συμπεριλαμβάνεται στο πρόγραμμα ET_o calculator με την έννοια της εξίσωσης FAO Penman-Monteith. Αυτή η μέθοδος έχει επιλεγθεί από τον FAO και περιέχει φυσικές και αεροδυναμικές παραμέτρους (FAO, 2012).

Περιγραφή δεδομένων εισόδου

Εικόνα 2.7.1: Κλιματικές παράμετροι που μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τον υπολογισμό του ET_o (http 3)

Στο φύλλο περιγραφή δεδομένων εισόδου, οι κλιματικές παράμετροι που απεικονίζονται χρησιμοποιούνται για τον υπολογισμό της Εξατμισοδιαπνοής αναφοράς (ET_o) (Εικ.2.7.1). Τα δεδομένα κατατάσσονται σε 4 ομάδες: Θερμοκρασία αέρα, ατμοσφαιρική υγρασία, ταχύτητα ανέμου, ηλιοφάνεια και ακτινοβολία. Όλες οι διαθέσιμες κλιματικές παράμετροι στον επιλεγμένο ή εισηγμένο φάκελο είναι από την προεπιλογή. Αφαιρώντας μια επιλογή τότε οι προσδιορισμένες τιμές για την αντίστοιχη κλιματική παράμετρο δε θα χρησιμοποιηθεί για τον υπολογισμό του ET_o και θα αφαιρεθεί από τον φάκελο δεδομένων όταν ο χρήστης επιστρέψει στο **Main menu**. Όταν ένας φάκελος έχει δημιουργηθεί τότε ο χρήστης προσδιορίζει στο κεντρικό μενού, τις κλιματικές παραμέτρους που θα χρησιμοποιηθούν για να υπολογίσουν την Εξατμισοδιαπνοή αναφοράς (ET_o) (FAO, 2012).

Στη περίπτωση των δεδομένων υγρασίας, δεδομένα ταχύτητας ανέμου ή ακτινοβολίας δεν είναι διαθέσιμα για μία ημέρα, 10 ημέρες ή μηνιαία και το πρόγραμμα θα χρησιμοποιήσει τις

προσδιορισμένες πληροφορίες στα αντίστοιχα κουτιά για να κάνει εκτίμηση των χαμένων μετεωρολογικών δεδομένων (Εικ.2.7.1) (FAO, 2012).

Τιμές για τους συντελεστές a και b από την εξίσωση του Angstrom μπορούν να προσαρμοστούν αν τα δεδομένα της ηλιακής ακτινοβολίας είναι διαθέσιμα και η βαθμονόμηση έχει πραγματοποιηθεί (FAO, 2012). Επιλέγοντας το **<Defaults>** το πρόγραμμα κάνει επαναφορά των τιμών των συντελεστών στις προεπιλεγμένες τιμές όπως ορίζεται στη βιβλιογραφία.

Μετεωρολογικά δεδομένα και ET_o

Στα μετεωρολογικά δεδομένα και φύλλο ET_o , ορίζονται οι τιμές για τις επιλεγμένες κλιματολογικές παραμέτρους. Τα ακραία κλιματικά δεδομένα δεν εισάγονται. Αν τίποτα δεν είναι λάθος με τα δεδομένα και η επιλεγμένη μονάδα είναι η σωστή, ο χρήστης μπορεί να επεκτείνει τα όρια που καθορίζονται από το πρόγραμμα για το συγκεκριμένο αρχείο δεδομένων κάνοντας κλικ στο κουμπί **<Data limits>** (FAO, 2012).

Αν λείπουν τιμές για περισσότερες από μία κλιματικές παραμέτρους (Θερμοκρασία αέρα, Υγρασία αέρα, Ταχύτητα ανέμου ή Ηλιοφάνεια και Ακτινοβολία) τότε το πρόγραμμα θα εφαρμόσει τους ειδικούς κανόνες υπολογισμού (FAO, 2012).

Με τη μέθοδο του FAO Penman-Monteith και τα διαθέσιμα κλιματικά δεδομένα, το ET_o υπολογίζεται και τα αποτελέσματα εμφανίζονται στα αντίστοιχα κελιά. Αν λείπουν κλιματικά δεδομένα τότε η Εξατμισοδιαπνοή αναφοράς (ET_o) δεν μπορεί να υπολογιστεί και το κελί του ET_o παραμένει μαύρο (FAO, 2012).

Plot data

Τα προσδιορισμένα κλιματικά δεδομένα μπορούν να απεικονιστούν στο φύλλο **Plot data** (Εικ.2.7.2). Επιλέγοντας στο **<Plot options>** ο χρήστης έχει πρόσβαση στο **Plot Menu**. Σε αυτό το μενού ο χρήστης προσδιορίζει α) τα κλιματικά δεδομένα που πρέπει να σχεδιάζονται β) το φάσμα οικοπέδου (μέγιστο/ελάχιστο) γ) το στυλ του οικοπέδου (FAO, 2012).

Τα προσδιορισμένα κλιματικά δεδομένα περιλαμβάνουν:

-Θερμοκρασία: μέση θερμοκρασία (T_{mean}), μέγιστη θερμοκρασία (T_{max}), Ελάχιστη θερμοκρασία (T_{min}), σημείο δρόσου (T_{dew}), ξηρή (T_{dry}) και υγρή (T_{wet}) ;

-Σχετική υγρασία: Μέση σχετική υγρασία (RH_{mean}), μέγιστη (RH_{max}), ελάχιστη (RH_{min});

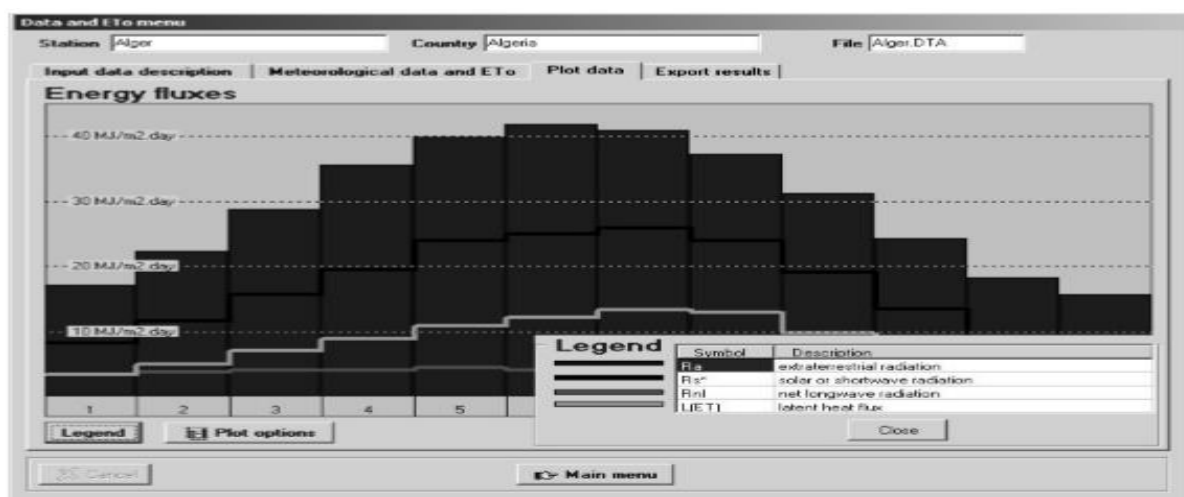
-Ατμοπίεση: Πραγματική πίεση $e(\text{act})$ και κορεσμένη $e(s)$, η διαφορά πίεσης ατμών υπολογίζεται από το τύπο $(e(\text{act})-e(s))$;

-Διάρκεια ηλιοφάνειας: πραγματική διάρκεια ηλιοφάνειας σε μία ημέρα (n) και μέγιστη δυνατή διάρκεια ηλιοφάνειας σε ώρες;

-Ενεργειακή ροή: εξωγήινη (R_a), ηλιακή ακτινοβολία σε καθαρό ουρανό (R_{so}), ηλιακά ή βραχέα κύματα (R_s), καθαρή ηλιακή (R_{ns}), καθαρή ακτινοβολία μεγάλου μήκους κύματος (R_{nl}), καθαρή ακτινοβολία (R_n) και η λανθάνουσα ροή θερμότητας ($L(ET)$);

-Σχετική ακτινοβολία: σχετική διάρκεια ηλιοφάνειας (n/N) και σχετική ακτινοβολία βραχέων κυμάτων (R_s/R_{so})

-Εξατμισοδιαπνοή (ET_o)



Εικόνα 2.7.2: Οικόπεδο ενεργειακής ροής Εξωγήινη (bars), ηλιακή και καθαρή μεγάλου μήκους κύματος ακτινοβολία και λανθάνουσα ροής θερμότητα (<http4>)

Εξαγωγή αποτελεσμάτων

Τα προσδιορισμένα κλιματικά δεδομένα που έχουν προέλθει μπορούν να εξαχθούν στο φύλλο **Export results sheet**. Ο χρήστης επιλέγει αν θα απαρτίζεται από το ET_o calculator το οποίο θα σωθεί στο κατάλογο **REPORT** ή στους 'κλιματικούς φακέλους' πρέπει να εξαχθούν στη βάση δεδομένων του Aquacrop. Οι κλιματικοί φάκελοι αποτελούνται από : α) έναν φάκελο ET_o και β) φάκελο θερμοκρασίας του αέρα. Ο χρήστης μπορεί να μεταβάλλει :

-το κομμάτι όπου έχουν σωθεί τα αρχεία

-το όνομα του φακέλου

-τη περιγραφή του φακέλου

2.8 Εξατμισοδιαπνοή Αναφοράς (FAO-Monteith)

Η σχετική ακρίβεια και σταθερή απόδοση του Penman-Monteith σε άγονα και υγρά κλίματα έχουν ενδεικνυθεί στην ASCE και ευρωπαϊκές μελέτες. Η εξίσωση του FAO-Monteith δίνεται από την εξίσωση:

$$ET_o = [0,408\Delta(R_n - G) + \gamma \frac{900}{T + 273} u_2 (e_s - e_a)] / \Delta + \gamma(1 + 0,34u_2)$$

Όπου:

ET_o = Εξατμισοδιαπνοή αναφοράς

R_n = Καθαρή ακτινοβολία στην επιφάνεια της καλλιέργειας

G = πυκνότητα ροής θερμότητας εδάφους

T = μέση ημερήσια θερμοκρασία στα 2 m ύψος

u_2 = η ταχύτητα του ανέμου σε 2 m επάνω από την επιφάνεια του εδάφους (ms^{-1})

e_s = κορεσμός πίεσης ατμών (kPa)

e_a = είναι η πραγματική πίεση ατμών

$e_s - e_a$ = κορεσμός έλλειψης πίεσης υδρατμών

γ = η ψυχομετρική σταθερά ($kPa^{\circ}C^{-1}$)

Δ = κλίση καμπύλης πίεσης ατμών ($kPa^{\circ}C^{-1}$)

Στην παραπάνω εξίσωση η τιμή 0,408 μετατρέπει την R_n που εκφράζεται σε MJ/m^2 σε ισοδύναμη εξάτμιση mm/day. Επειδή η ροή της θερμότητας του εδάφους είναι μικρή σε σχέση με την R_n ειδικά όταν η επιφάνεια καλύπτεται από βλάστηση και τα βήματα υπολογισμού είναι 24h ή και περισσότερο, ο υπολογισμός του G αγνοείται στην αριθμομηχανή και υποτίθεται ότι είναι 0. Αυτό αντιστοιχεί με την υπόθεση που αναφέρθηκαν στον FAO Irrigation and Drainage Paper n° 56 για ημερήσιες ή 10-ήμερες χρονικές περιόδους. Οι Allen et al. (1989) δηλώνουν ότι η ροή

θερμότητας κάτω από την επιφάνεια του εδάφους είναι μικρή για μικρό χρονικό διάστημα (FAO, 2012).

2.9 Διαδικασία Εξατμισοδιαπνοής αναφοράς (ET_o)

Εξατμισοδιαπνοή είναι ο συνδυασμός εξάτμισης του εδάφους και διαπνοής καλλιεργειών. Οι παράμετροι καιρού, τα χαρακτηριστικά καλλιέργειας, και οι διαχειριστικές και περιβαλλοντικές πτυχές επηρεάζουν την εξατμισοδιαπνοή. Ο ρυθμός εξατμισοδιαπνοής συμβολίζεται με ET_o . Οι παράγοντες του εδάφους δεν επηρεάζουν την Εξατμισοδιαπνοή αναφοράς (ET_o) ενώ οι μόνοι παράγοντες που επηρεάζουν την Εξατμισοδιαπνοή αναφοράς (ET_o) είναι οι κλιματικές παράμετροι. Κατά συνέπεια, η Εξατμισοδιαπνοή αναφοράς (ET_o) είναι κλιματική παράμετρος και μπορεί να υπολογιστεί από τα δεδομένα καιρού. Εκφράζει τη δύναμη εξάτμισης στην ατμόσφαιρα σε μια συγκεκριμένη τοποθεσία και χρονική περίοδο του χρόνου και όχι τα χαρακτηριστικά της καλλιέργειας και τους παράγοντες του εδάφους.

Ένας μεγάλος αριθμός εμπειρικών και ημι-εμπειρικών εξισώσεων έχουν αναπτυχθεί για την εκτίμηση της εξατμισοδιαπνοής από μετεωρολογικά δεδομένα. Η μέθοδος FAO-Penman-Monteith συνίσταται πλέον ως η πρότυπη μέθοδος για τον προσδιορισμό και τον υπολογισμό της Εξατμισοδιαπνοής αναφοράς (ET_o). Ανοίγοντας το πρόγραμμα **ET_o calculator** και πατώντας <Start program> εμφανίζεται το <Main menu> της <Data base management> και επιλέγω το <Create a new file>. Στη συνέχεια, ονομάζω το αρχείο μου στο File name (KYPARISSIA_ELLADA) και συμπληρώνω τις πληροφορίες του κλιματικού σταθμού που απαιτούνται για τη χρησιμοποίηση του προγράμματος. Οι πληροφορίες αυτές αποτελούν το όνομα του κλιματικού σταθμού (Station:KYPARISSIA και Country:ELLADA), το γεωγραφικό πλάτος (37deg 12 min, Νότιο), το γεωγραφικό μήκος (21deg 42 min, Δυτικό), το υψόμετρο σε μέτρα (36m) γύρω από το επίπεδο της θάλασσας. Στο ίδιο φύλλο συμπληρώνεται η πληροφορία για το τύπο των δεδομένων που θα χρησιμοποιηθούν. Τα μετεωρολογικά δεδομένα αποτελούνται από τους μέσους μερικών χρόνων (1 Ιανουαρίου 2013 έως 31 Δεκεμβρίου 2016), τα δεδομένα δεν πρέπει να συνδέονται με ένα συγκεκριμένο χρόνο και ο χρόνος δε πρέπει να προσδιορίζεται.

Η έννοια της Εξατμισοδιαπνοής αναφοράς από τα μετεωρολογικά δεδομένα συμπεριλαμβάνεται στο πρόγραμμα ET_o calculator με την έννοια της εξίσωσης FAO Penman-Monteith. Αυτή η μέθοδος έχει επιλεγεί από τον FAO και περιέχει φυσικές και αεροδυναμικές παραμέτρους. Στη συνέχεια, στο <Data and ET_o menu>, προσδιορίζονται οι παράμετροι που θα χρησιμοποιηθούν από τα δεδομένα για τον υπολογισμό της Εξατμισοδιαπνοής αναφοράς (ET_o). Στη

περίπτωση μας επιλέχθηκαν: η μέση θερμοκρασία αέρα (T_{mean}), η μέγιστη θερμοκρασία αέρα (T_{max}), η ελάχιστη θερμοκρασία αέρα (T_{min}) επιλέγοντας $^{\circ}\text{C}$, η μέγιστη σχετική υγρασία (RH_{max}), η ελάχιστη σχετική υγρασία (RH_{min}) εκφρασμένες επί % και η μέση ταχύτητα ανέμου (u) σε m/s ενώ τιμές για τους συντελεστές a και b προκύπτουν από την εξίσωση του Angstrom. Στο **<Meteorological data and ET_0 >** ορίζονται οι τιμές για τις επιλεγμένες κλιματολογικές παραμέτρους. Τα ακραία κλιματικά δεδομένα δεν εισάγονται. Ο χρήστης μπορεί να επεκτείνει τα όρια που καθορίζονται από το πρόγραμμα για το συγκεκριμένο αρχείο δεδομένων κάνοντας κλικ στο κουμπί **<Data limits>**.

Αν λείπουν τιμές για περισσότερες από μία κλιματικές παραμέτρους (Θερμοκρασία αέρα, Υγρασία αέρα, Ταχύτητα ανέμου) τότε το πρόγραμμα θα εφαρμόσει τους ειδικούς κανόνες υπολογισμού. Με τη μέθοδο του FAO Penman-Monteith και τα διαθέσιμα κλιματικά δεδομένα, η Εξατμισοδιαπνοή αναφοράς (ET_0) υπολογίζεται και τα αποτελέσματα εμφανίζονται στα αντίστοιχα κελιά. Αν λείπουν κλιματικά δεδομένα τότε η Εξατμισοδιαπνοή αναφοράς (ET_0) δεν μπορεί να υπολογιστεί και το κελί του ET_0 παραμένει μαύρο. Τα προσδιορισμένα κλιματικά δεδομένα μπορούν να απεικονιστούν στο φύλλο **<Plot data>**.

3. Aquacrop

3.1 Το περιβάλλον του Aquacrop

Το AquaCrop είναι ένα μοντέλο παραγωγικότητας καλλιεργειών νερού που αναπτύχθηκε από τον FAO Land and Water Division για την αντιμετώπιση της επισιτιστικής ασφάλειας και την εκτίμηση της επίδρασης του περιβάλλοντος και της διαχείρισης στη φυτική παραγωγή. Το AquaCrop προσομοιώνει την απόκριση απόδοσης ποωδών, κηπευτικών και λαχανοκομικών καλλιεργειών στο νερό και είναι ιδιαίτερα κατάλληλο για συνθήκες στις οποίες το νερό είναι βασικός περιοριστικός παράγοντας στην καλλιέργεια. Κατά το σχεδιασμό του μοντέλου, επιδιώχθηκε η βέλτιστη ισορροπία μεταξύ απλότητας, ακρίβειας και ευρωστίας. Για να είναι ευρέως εφαρμόσιμη, το AquaCrop χρησιμοποιεί μόνο σχετικά μικρό αριθμό ρητών παραμέτρων και ως επί το πλείστον διαισθητικών μεταβλητών εισόδου που απαιτούν απλές μεθόδους για τον προσδιορισμό τους. Από την άλλη πλευρά, οι διαδικασίες υπολογισμού βασίζονται σε βασικές και συχνά πολύπλοκες βιοφυσικές διεργασίες που εγγυώνται μια ακριβή προσομοίωση της απόκρισης της καλλιέργειας στο σύστημα φυτών-εδάφους. Το Aquacrop είναι ένα μενού με γνώμονα το πρόγραμμα και με μια καλά ανεπτυγμένη διεπαφή με το χρήστη. Πολλαπλά γραφήματα και σχηματικές απεικονίσεις βοηθούν το χρήστη να διακρίνει τις επιπτώσεις από τις αλλαγές εισόδου και να αναλύσει τα αποτελέσματα προσομοίωσης. Για κάθε ημέρα της περιόδου προσομοίωσης, το Aquacrop απαιτεί μια ελάχιστη και μια μέγιστη θερμοκρασία αέρα, εξατμισοδιαπνοή αναφοράς (ET_0), βροχόπτωση και μέση ετήσια συγκέντρωση CO_2 της ατμόσφαιρας. Τα κλιματικά δεδομένα έχουν ανακτηθεί από φακέλους που περιέχουν ημερήσια, 10-ήμερα ή μηνιαία δεδομένα. Σε περίπτωση απουσίας καθημερινών δεδομένων τότε η είσοδος αποτελείται από 10-ήμερα ή μηνιαία δεδομένα και το πρόγραμμα χρησιμοποιεί μια διαδικασία παρεμβολής προκειμένου να αποκτήσει καθημερινά δεδομένα θερμοκρασίας από τα μέσα 10-ήμερα ή μηνιαία δεδομένα. Η Εξατμισοδιαπνοή αναφοράς συμβολίζεται με το ET_0 και χρησιμοποιείται στο Aquacrop σαν μέτρο απαίτησης εξάτμισης από την ατμόσφαιρα. Είναι η αναλογία εξατμισοδιαπνοής από την επιφάνεια και όχι έλλειψη νερού (FAO, 2012). Ένα τεράστιο ομοιόμορφο τμήμα γρασιδιού (ή alfalfa) θεωρείται παγκοσμίως επιφάνεια. Τα δεδομένα της Εξατμισοδιαπνοής αναφοράς (ET_0) μπορεί να προέρχονται από μετεωρολογικό σταθμό μέσω της εξίσωσης FAO Penman-Monteith και γιαυτό είναι διαθέσιμος ένας τρόπος υπολογισμού του ET_0 γιαυτό το σκοπό. Μέσα στον υπολογιστή αυτό, τα δεδομένα από ένα μετεωρολογικό σταθμό μπορούν να προσδιοριστούν σε μια μεγάλη ποικιλία από μονάδες, μετεωρολογικά δεδομένα μπορούν να εισαχθούν, διαδικασίες είναι διαθέσιμες να προσεγγίσουν χαμένα κλιματικά δεδομένα και η υπολογισμένη εξατμισοδιαπνοή αναφοράς εξάγεται στο Aquacrop. Για βροχόπτωση με εξαιρετικά ανομοιογενή κατανομή με τη πάροδο του χρόνου, η

χρήση μακροπρόθεσμων μέσων δεδομένων δεν συνιστάται. Σε περίπτωση που δεν είναι διαθέσιμα ημερήσια δεδομένα βροχόπτωσης τότε 10-ήμερα και μηνιαία δεδομένα μπορούν να χρησιμοποιηθούν σαν είσοδος. Ακόμη, επιλέγεται το είδος της καλλιέργειας που θα γίνει η διαχείριση άρδευσης του και θα υπολογιστεί η εξατμισοδιαπνοή αναφοράς του. Στο AquaCrop θεωρείται ότι το στρες θερμοκρασίας επηρεάζει τη παραγωγή βιομάζας και την επικονίαση. Οι χαμηλές θερμοκρασίες μπορούν να προκαλέσουν στρες στην ανάπτυξη και ωρίμανση της καλλιέργειας. Όσον αφορά, το στρες στη γονιμότητα του εδάφους, στηρίζεται σε θεμελιώδεις έννοιες. Αυτό περιγράφεται από μια ποιοτική αξιολόγηση. Η έλλειψη αζώτου μπορεί να i) μειώσει την ανάπτυξη της φυλλικής επιφάνειας με αποτέλεσμα μια πιο αργή ανάπτυξη (ii) τη μέγιστη φυλλική επιφάνεια που μπορεί να επιτευχθεί (CC_x) (FAO, 2012).

Επιπλέον, σύμφωνα με μακροχρόνιο στρες, (iii) CC υφίσταται κανονικά σταθερή μείωση μόλις το προσαρμοσμένο CC_x φτάσει στα μέσα της σεζόν. Περαιτέρω (iv) το στρες της γονιμότητας του εδάφους μειώνει την παραγωγικότητα του νερού (WP^*). Επιπλέον, το στρες της αλατότητας του εδάφους προκαλεί το κλείσιμο των στομάτων. Το στρες της αλατότητας του εδάφους μειώνει τη παραγωγικότητα βιομάζας (B). Η μείωση στη βιομάζα είναι αποτέλεσμα του κλείσιμου των στομάτων στη καλλιέργεια και της κακής ανάπτυξης της καλλιέργειας (η κακή ανάπτυξη και η κακή συγκομιδή οφείλεται στο κύκλο της καλλιέργειας). Αν και η συνολική μείωση στη βιομάζα και οι αιτίες μείωσης είναι γνωστές, η μεμονωμένη επίδραση του στρες της αλατότητας του εδάφους για καθεμιά από τις διαδικασίες δεν είναι ακόμη επαρκής και τεκμηριωμένη για την προσομοίωση στο AquaCrop. Ο χρήστης καθορίζει την πρώτη ημέρα της παρατηρούμενης ή προγραμματισμένης έναρξης του καλλιεργητικού κύκλου (δηλαδή την πρώτη ημέρα μετά τη σπορά ή τη φύτευση). Εάν τα επιλεγμένα κλιματικά δεδομένα που συνδέονται με συγκεκριμένο έτος, η έναρξη της καλλιεργητικής περιόδου συνδέεται επίσης με το εν λόγω έτος. Αν τα κλιματικά δεδομένα αποτελούνται από πολλά χρόνια, η περίοδος ανάπτυξης του καλλιεργητικού κύκλου λαμβάνει χώρα κατά το πρώτο έτος της. Το AquaCrop προσφέρει τη δυνατότητα να δημιουργήσει την ημερομηνία σποράς / φύτευσης με βάση τη θερμοκρασία του αέρα. Επιλέγοντας το ένα ή το άλλο κριτήριο, τη πιθανότερη ημερομηνία φύτευσης/σποράς. Ο χρήστης καθορίζει την ημερομηνία, το βάθος εφαρμογής και την ποιότητα του νερού για κάθε περίπτωση άρδευσης. Το βάθος άρδευσης αναφέρεται στο καθαρό ποσό της άρδευσης. Το κριτήριο του χρόνου καθορίζει «Πότε», μια άρδευση πρέπει να εφαρμοστεί, ενώ το κριτήριο βάθους καθορίζει «Πόσο», νερό πρέπει να εφαρμοστεί. Μετά την επιλογή των κριτηρίων, οι τιμές σχετίζονται με το χρόνο, το βάθος και τη ποιότητα του νερού που πρέπει να προσδιορίζονται. Οι τιμές που αναφέρονται σε μια συγκεκριμένη ημέρα της καλλιεργητικής περιόδου θα ισχύουν μέχρι την ημερομηνία που έχει καθοριστεί κάποια

άλλη τιμή ή στο τέλος της καλλιεργητικής περιόδου, όταν δεν υπάρχουν τιμές σε μεταγενέστερες ημερομηνίες που καθορίζονται. Η ποιότητα εκφράζεται από την ηλεκτρική αγωγιμότητα του νερού άρδευσης (EC_w) σε deciSiemens ανά μέτρο (dS / m). Η παραγωγή βιομάζας μειώνεται ως αποτέλεσμα της επίδρασης της γονιμότητας του εδάφους στην (i) ανάπτυξη της φυλλικής επιφάνειας (CC) και ως εκ τούτου στην διαπνοή της καλλιέργειας και (ii) στη παραγωγικότητα νερού βιομάζας (WP *). Προστατευτικά στρώματα που καλύπτουν την επιφάνεια του εδάφους θα επηρεάσουν την εξάτμιση του εδάφους. Η επιλεγμένη περίοδος προσομοίωσης για μια εκτέλεση προσομοίωσης μπορεί να εμφανιστεί στο μενού *Display of simulation period* και να ρυθμιστεί στο μενού *Simulation period*. Η διάρκεια του καλλιεργητικού κύκλου και το εύρος των διαθέσιμων κλιματικών δεδομένων δίνεται σαν πρότυπο στο μενού. Τέλος, τα αρχεία αποθηκεύονται από προεπιλογή στον κατάλογο OUTP του AquaCrop (FAO, 2012).

Στην εργασία αυτή επικεντρωνόμαστε στην κλιματική παράμετρο Εξατμισοδιαπνοή αναφοράς (ET_o) η οποία υπολογίζεται από τα δεδομένα καιρού. Ένας μεγάλος αριθμός εμπειρικών και ημι-εμπειρικών εξισώσεων έχουν αναπτυχθεί για την εκτίμηση της εξατμισοδιαπνοής από μετεωρολογικά δεδομένα. Η παράμετρος αυτή προσδιορίζεται και υπολογίζεται με τη μέθοδο FAO-Penman-Monteith η οποία συμπεριλαμβάνεται στο λογισμικό ET_o calculator. Στο πρόγραμμα αυτό συμπληρώνονται οι πληροφορίες του κλιματικού σταθμού που απαιτούνται για τη χρησιμοποίηση του προγράμματος. Οι πληροφορίες αυτές αποτελούν το όνομα του κλιματικού σταθμού, όπου στη περίπτωση μας είναι ο σταθμός της Κυπαρισσίας καθώς και η χώρα που βρίσκεται αυτός ο σταθμός (Station:KYPARISSIA και Country:ELLADA), το γεωγραφικό πλάτος (37deg 12 min, Νότιο), το γεωγραφικό μήκος (21deg 42 min, Δυτικό) και το υψόμετρο σε μέτρα (36m) γύρω από το επίπεδο της θάλασσας. Τα μετεωρολογικά δεδομένα που χρησιμοποιήθηκαν από τον σταθμό που προαναφέρθηκε δεν πρέπει να συνδέονται με ένα συγκεκριμένο χρόνο και γι' αυτό το λόγο είναι μηνιαία και αποτελούνται από τους μέσους μερικών χρόνων (1 Ιανουαρίου 2013 έως 31 Δεκεμβρίου 2016) (FAO, 2012).

Το AquaCrop είναι ένα μενού με γνώμονα το πρόγραμμα και με μια καλά ανεπτυγμένη διεπαφή με το χρήστη. Τα windows (λέγονται μενού) είναι η διεπαφή ανάμεσα στο χρήστη και στο πρόγραμμα. Πολλαπλά γραφήματα και σχηματικές απεικονίσεις βοηθούν το χρήστη να διακρίνει τις επιπτώσεις από τις αλλαγές εισόδου και να αναλύσει τα αποτελέσματα προσομοίωσης (FAO, 2012).

Από το *Main menu* ο χρήστης έχει πρόσβαση σε ένα σύνολο από μενού όπου εμφανίζονται τα δεδομένα εισόδου και μπορούν να ενημερωθούν. Η είσοδος αποτελείται από δεδομένα καιρού, δεδομένα καλλιέργειας, διαχείριση αρδεύσεων και πεδίο, χαρακτηριστικά εδάφους και υπεδάφους τα

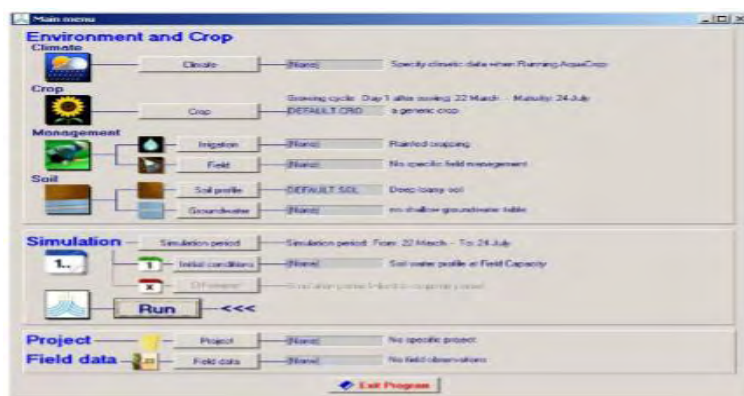
οποία καθορίζουν το περιβάλλον μέσα στο οποίο η καλλιέργεια θα αναπτυχθεί. Επίσης, η ημέρα σποράς ή ημέρα φύτευσης, η περίοδος προσομοίωσης και οι συνθήκες στην αρχή της περιόδου προσομοίωσης είναι δεδομένα εισόδου. Αν η περίοδος προσομοίωσης δε συμπίπτει με την ανάπτυξη της καλλιέργειας, τις συνθήκες εκτός εποχής καλλιεργητικής περιόδου, η καλλιεργητική περίοδος μπορεί να καθοριστεί σαν είσοδος δεδομένων (FAO, 2012).

Πριν ξεκινήσει η προσομοίωση ο χρήστης προσδιορίζει στο **Main menu** την ημερομηνία σποράς, τη περίοδο προσομοίωσης, τις κατάλληλες περιβαλλοντικές, τις εντός και εκτός εποχής συνθήκες. Η είσοδος μπορεί να ανακτηθεί από τα αρχεία εισόδου. Σε περίπτωση απουσίας αρχείων εισόδου, οι προεπιλεγμένες ρυθμίσεις είναι υποθετικές. Ο χρήστης μπορεί να επιλέξει ένα αρχείο το οποίο περιέχει όλες τις απαιτούμενες πληροφορίες για να ξεκινήσει το πρόγραμμα, και ένα πεδίο με μετρήσεις για να αξιολογήσει τα αποτελέσματα προσομοίωσης (FAO, 2012).

Όταν τρέχει μια προσομοίωση, ο χρήστης μπορεί στο μενού **Simulation run** να κάνει αλλαγές στο νερό του εδάφους και στη περιεκτικότητα αλατότητας, στις αντίστοιχες αλλαγές στην ανάπτυξη της καλλιέργειας, στο ρυθμό εξάτμισης και διαπνοής, στη παραγωγή βιομάζας, στην ανάπτυξη απόδοσης και στη παραγωγικότητα νερού. Τα αποτελέσματα προσομοίωσης είναι αποθηκευμένα σε αρχεία εξόδου και τα δεδομένα μπορούν να ανακτηθούν σε προγράμματα υπολογιστικών φύλλων για περαιτέρω επεξεργασία και ανάλυση (FAO, 2012).

Οι ρυθμίσεις του προγράμματος επιτρέπουν στον χρήστη να απενεργοποιήσει τις διαδικασίες υπολογισμού ή να αλλάξει τις προεπιλεγμένες ρυθμίσεις στο Aquacrop. Με το <Reset> δίνει εντολή στο μενού **Program Settings**, οι ρυθμίσεις μπορούν να επανέλθουν στις προεπιλεγμένες τους (FAO, 2012).

3.2 Κεντρικό μενού



Εικόνα 3.2: Κεντρικό Μενού του Aquacrop ([http 5](http://5))

Το **Main menu** αποτελείται από 3 πίνακες όπου εμφανίζονται τα ονόματα και οι περιγραφές των επιλεγμένων αρχείων εισόδου (Εικ.3.2):

A.Περιβαλλοντικός πίνακας: όπου ο χρήστης:

1) Επιλέγει ή δημιουργεί το Κλίμα (Θερμοκρασία, Εξατμισοδιαπνοή αναφοράς, Βροχόπτωση, Διοξείδιο του άνθρακα), τη καλλιέργεια, τη Διαχείριση (Άρδευσης ή Πεδίου), το προφίλ του εδάφους και αρχεία υπόγειων υδάτων και ενημερώνει τα αντίστοιχα δεδομένα;

2) Προσδιορίζει την έναρξη του καλλιεργητικού κύκλου (FAO, 2012).

B.Πίνακας Προσομοίωσης: όπου ο χρήστης:

3) Προσδιορίζει: i) τη περίοδο προσομοίωσης, ii) τις αρχικές συνθήκες για τη προσομοίωση και iii) τις εκτός εποχής συνθήκες όταν η περίοδος προσομοίωσης ξεπερνάει τη καλλιεργητική περίοδο;

4) Εκτελείται η προσομοίωση για το προσδιορισμένο περιβάλλον, τη περίοδο και τις συνθήκες (FAO.2012).

C. Πρόγραμμα και Πίνακας δεδομένων Πεδίου: Το πεδίο και τα στοιχεία του πίνακα μπορούν να επιλεγθούν, να δημιουργηθούν ή να εκσυγχρονισθούν (FAO, 2012).

3.3 Προεπιλεγμένες ρυθμίσεις στην έναρξη

Επιλεγμένα αρχεία εισόδου

Όταν το Aquacrop έχει ξεκινήσει τότε επιλέγει προεπιλεγμένο αρχείο καλλιέργειας και εδάφους. Κανένα άλλο αρχείο δεν είναι επιλεγμένο (Αρχεία είναι '(Κανένα)'). Σε περίπτωση που δε γνωρίζουμε το κλίμα, τη διαχείριση άρδευσης, τη διαχείριση πεδίου, τα υπόγεια ύδατα, τις συνθήκες εντός και εκτός εποχής τότε οι προεπιλεγμένες ρυθμίσεις είναι υποθετικές (FAO, 2012).

3.4 Επιλογή αρχείων εισόδου και αναίρεση επιλογής

Με την έννοια των <Select/create> εντολών στο **Main menu** ο χρήστης έχει πρόσβαση σε βάσεις δεδομένων όπου τα αρχεία εισόδου είναι αποθηκευμένα (Εικ.3.4). Η προεπιλεγμένη βάση δεδομένων είναι τα **DATA** υποκατάλογος από το φάκελο του Aquacrop. Με την εντολή <Path > αναγκάζει το χρήστη να προσδιορίσει άλλους καταλόγους (FAO, 2012).



Εικόνα 3.4 : Πρόσβαση στο μενού *Select climate file* όπου τα δεδομένα αρχείου μπορούν να επιλεγθούν από τη βάση δεδομένων και η επιλογή μπορεί να αναιρεθεί από την εντολή *<UNDO selection>* (http6)

Επιλογή φακέλου

Κάνοντας κλικ στην εντολή *<Select>* στο *Main menu*, μία λίστα σχετικών διαθέσιμων αρχείων εισόδου στον επιλεγμένο κατάλογο εμφανίζεται σε ένα από τα μενού *Select file* (Εικ. 3.4). Ένα αρχείο εισόδου επιλέγεται κάνοντας κλικ στο όνομα του στη λίστα (FAO, 2012).

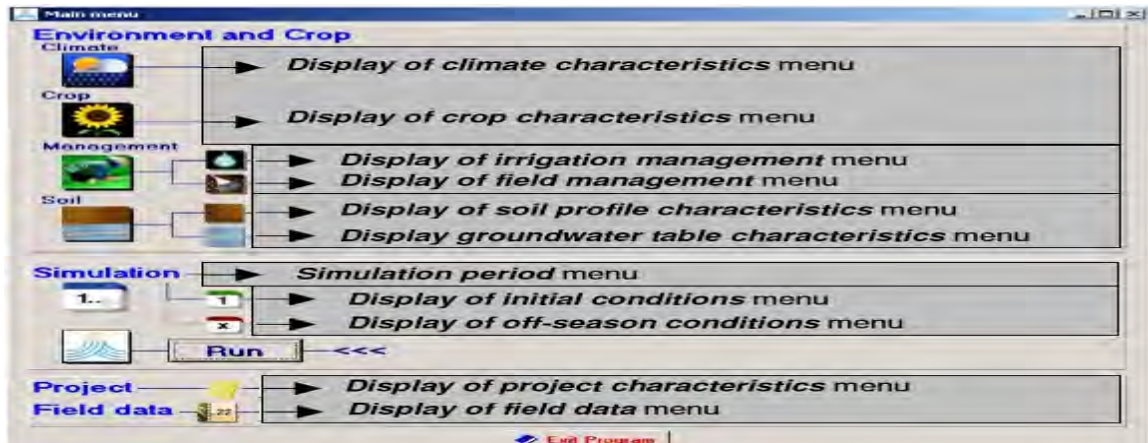
Αναίρεση επιλογής

Όταν το κλίμα, η άρδευση, το πεδίο διαχείρισης, τα υπόγεια ύδατα, οι αρχικές συνθήκες, οι εκτός εποχής συνθήκες, τα δεδομένα πεδίου ή ένα αρχείο έχει επιλεγθεί, μια επιλογή είναι διαθέσιμη να ανατρέξει την επιλογή και να το επαναφέρει στις προεπιλεγμένες ρυθμίσεις. Αυτό επιτυγχάνεται κάνοντας κλικ στην εντολή *<UNDO>* στο μενού *select file* (FAO, 2012).

3.5 Εμφάνιση και Ενημέρωση χαρακτηριστικών εισόδου

Εμφάνιση δεδομένων εισόδου

Από το *Main Menu* ο χρήστης έχει πρόσβαση σε ένα ολόκληρο σεντ μενού όπου τα δεδομένα εισόδου εμφανίζονται (Εικ.3.5.1). Αυτό γίνεται κάνοντας κλικ πάνω σε ένα όνομα φακέλου ή στο αντίστοιχο εικονίδιο στο *Main Menu* (FAO, 2012).

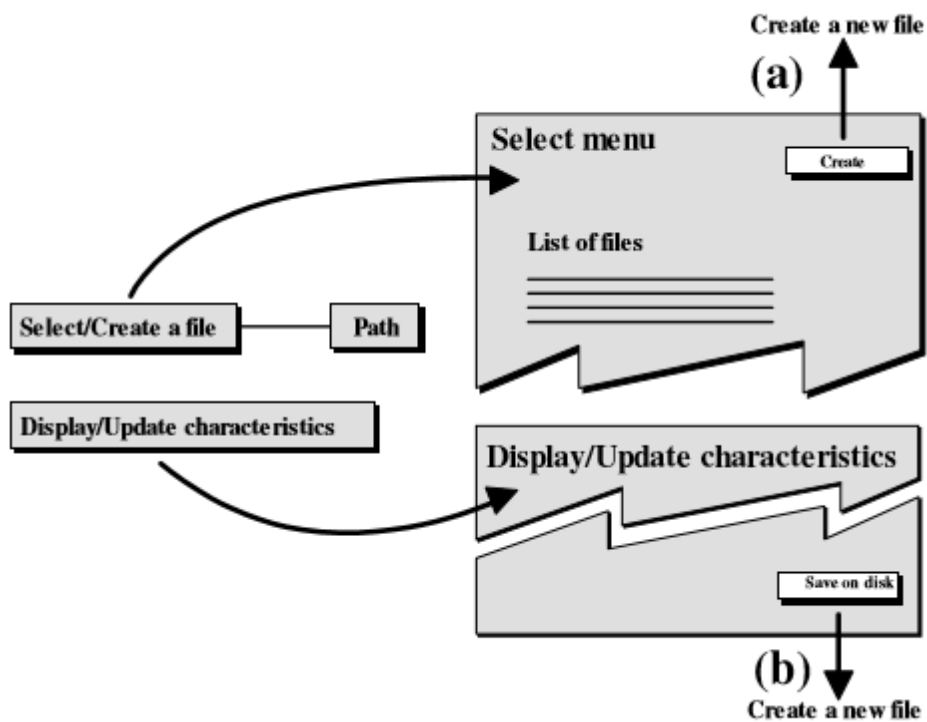


Εικόνα 3.5.1: Προσδιορισμένα δεδομένα εισόδου (<http7>)

3.6 Δημιουργία αρχείων εισόδου

Αποθήκευση της εντολής στο δίσκο

Μετά την ενημέρωση των χαρακτηριστικών σε ένα από τα μενού, ένα αρχείο εισόδου (αν δεν είναι ακόμη διαθέσιμο) δημιουργείται επιλέγοντας την εντολή **<Save on disk>** (FAO, 2012).



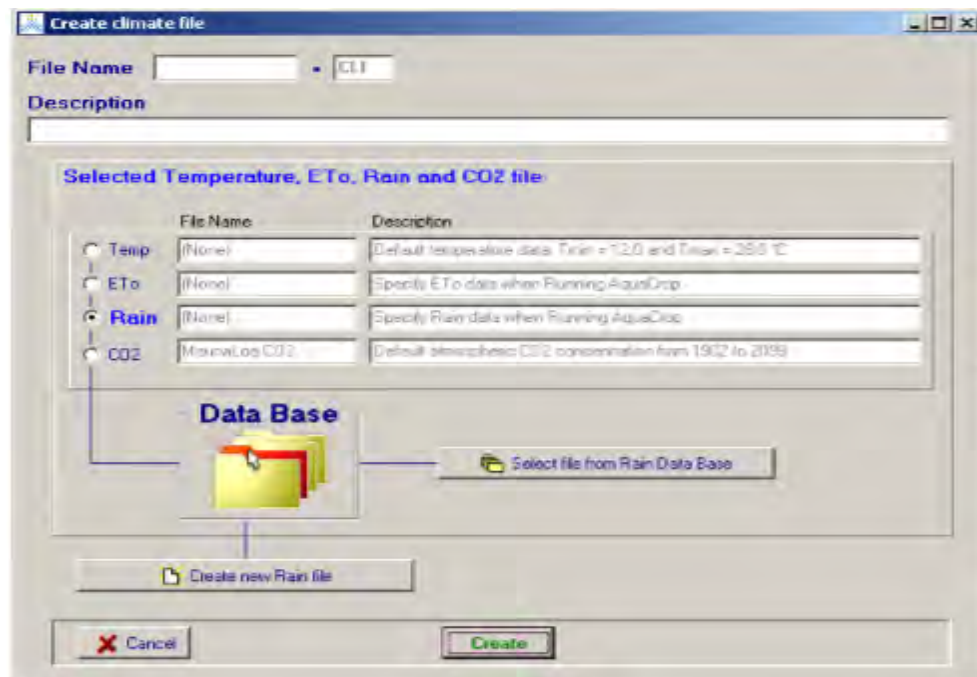
Εικόνα 3.6.1: Επιλογές διαθέσιμες να δημιουργήσουν αρχεία εισόδου από τη διεπαφή με το χρήστη (http8)

- **Δημιουργία φακέλου**

Create file μενού είναι διαθέσιμα να δημιουργήσουν αρχεία εισόδου για νέο κλίμα, καλλιέργεια, διαχείριση άρδευσης, προφίλ εδάφους, υπόγεια ύδατα, δεδομένα πεδίου ή στοιχεία έργου. Τα *Create file* μενού γίνονται διαθέσιμα επιλέγοντας την εντολή *<Create file>* στο μενού *<select file>* (Εικ.3.6.1) (FAO, 2012).

- **Δημιουργία φακέλου κλίματος**

Δημιουργώντας ένα φάκελο κλίματος συνίσταται στην επιλογή ή στη δημιουργία φακέλου θερμοκρασίας, φακέλου ET₀, φακέλου βροχόπτωσης και φακέλου CO₂ (Εικ.3.6.2) (FAO, 2012).



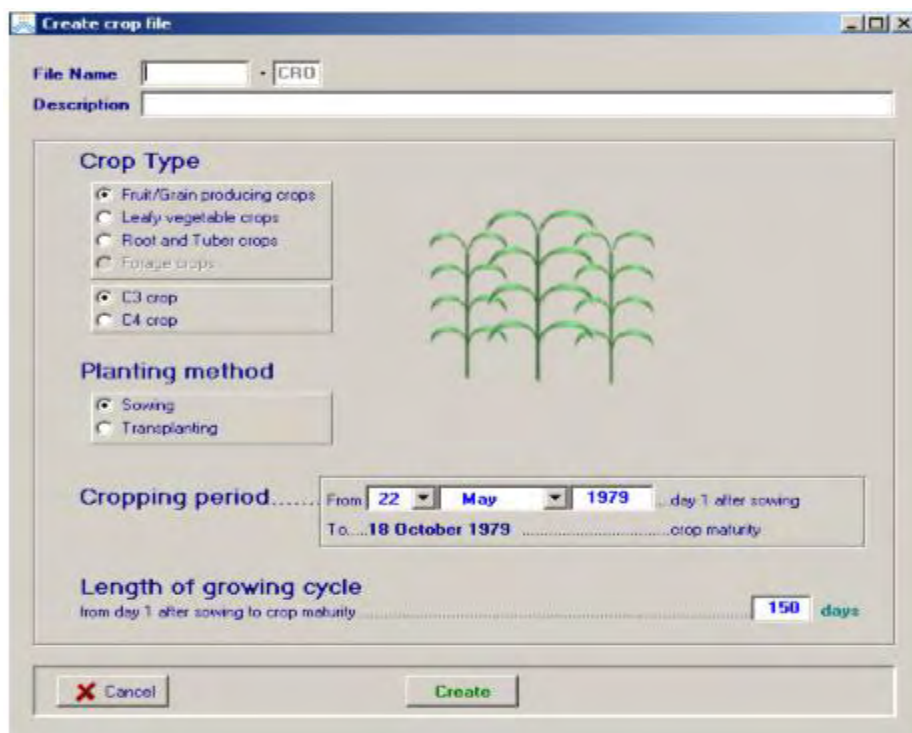
Εικόνα 3.6.2: Δημιουργία φακέλου κλίματος μενού (http9)

- Δημιουργία φακέλου ET₀, βροχόπτωσης ή θερμοκρασίας:

Όταν δημιουργούμε ένα φάκελο για θερμοκρασία, εξατμισοδιαπνοή αναφοράς, βροχόπτωση τότε ο χρήστης πρέπει να προσδιορίσει τον τύπο δεδομένων (ημερήσια, 10-ήμερα ή μηνιαία δεδομένα) το εύρος χρόνου και τα δεδομένα. Τα υπάρχοντα κλιματικά δεδομένα μπορούν να επικολληθούν σε φάκελο ET₀, βροχόπτωσης ή θερμοκρασίας εφόσον τηρείται η δομή του αρχείου (FAO, 2012).

- Δημιουργία φακέλου καλλιέργειας

Όταν δημιουργούμε ένα φάκελο καλλιέργειας, ο χρήστης επιλέγει τον τύπο καλλιέργειας και προσδιορίζει κάποιες παραμέτρους (Εικ3.6.3). Με τη βοήθεια αυτής της πληροφορίας, το AquaCrop δημιουργεί ένα ολοκληρωμένο σύνολο των απαιτούμενων παραμέτρων. Οι παράμετροι αυτοί εμφανίζονται και οι τιμές μπορούν να προσαρμοστούν στο μενού **Crop characteristics** (FAO, 2012).



Εικόνα 3.6.3: Δημιουργία φακέλου καλλιέργειας μενού (http10)

- **Δημιουργία φακέλου άρδευσης**

Όταν δημιουργούμε ένα φάκελο άρδευσης, ο τύπος του πρέπει πρώτα να επιλεγθεί:

- 1) Απαίτηση νερού άρδευσης ;
- 2) Πρόγραμμα άρδευσης ;ή
- 3) Χρονοδιάγραμμα άρδευσης

Στη συνέχεια, ο χρήστης καθορίζει τα απαιτούμενα στοιχεία:

- 1) Η επιτρεπόμενη εξάντληση άρδευσης κατά το προσδιορισμό απαίτησης νερού άρδευσης;
- 2) Χρόνος, βάθος και η ποιότητα του νερού άρδευσης από τα επιτυχημένα προγράμματα άρδευσης;
- 3) Η ποιότητα νερού άρδευσης, χρόνος και βάθος για την άρδευση, κριτήρια για αρδευτικά γεγονότα (FAO, 2012).

- **Δημιουργία αρχείου δεδομένων**

Όταν δημιουργούμε ένα αρχείο δεδομένων, ο χρήστης προσδιορίζει τη πράσινη συγκομιδή (CC) ή τη ξηρή υπέργεια βιομάζα (B), το περιεχόμενο του νερού του εδάφους (SWC) παρατηρούμενο σε συγκεκριμένες ημερομηνίες στο *Field Data* μενού (FAO, 2012).

3.7 Έξοδος και κλείσιμο μενού

Εντολές για έξοδο από μενού είναι διαθέσιμες στο πίνακα ελέγχου στο κάτω μέρος κάθε μενού (Εικ.3.7). Στην έξοδο, το παράθυρο θα κλείσει και ο έλεγχος επιστρέφεται στο *Main menu*. Η λειτουργία εξόδου καθορίζεται από την επιλεγμένη εντολή. Οι παρακάτω επιλογές για την έξοδο σε μενού είναι διαθέσιμες:

Όλες οι επιλογές για να κλείσουμε ένα μενού:

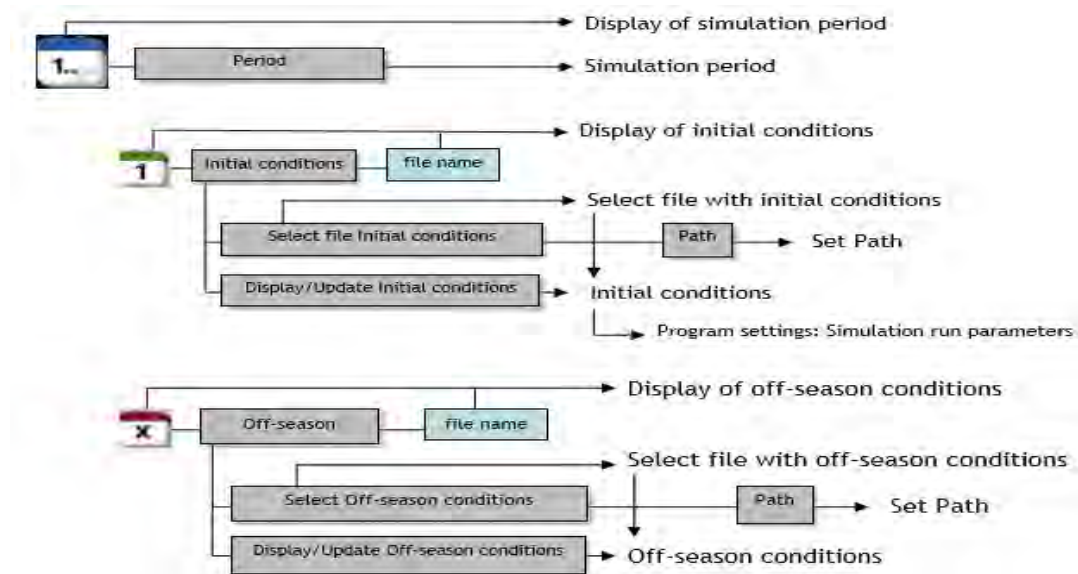
<**Cancel**> Όλες οι αλλαγές που έγιναν στην είσοδο θα αγνοηθούν γυρνώντας στο *Main menu*;

<**Return to main menu**> Πριν επιστρέψουμε στο *Main menu* το πρόγραμμα ελέγχει αν τα δεδομένα ή οι ρυθμίσεις έχουν αλλάξει στο μενού. Οι αλλαγές θα σωθούν αν ο χρήστης επιλέξει <**confirm**> να αποθηκεύσει τις αλλαγές.

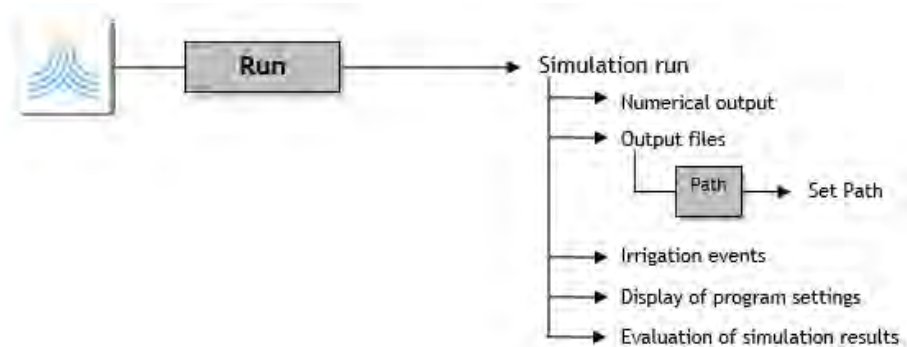
<**Save on disk**> Όταν τα δεδομένα δεν έχουν ανακτηθεί από ένα φάκελο αλλά αποτελείται από προεπιλεγμένες ρυθμίσεις τότε ο χρήστης μπορεί να επιλέξει να αποθηκεύει τα δεδομένα στο δίσκο πριν επιστρέψει στο *Main menu*.

<**Save as**> Όταν τα δεδομένα έχουν ανακτηθεί από ένα αρχείο εισόδου τότε ο χρήστης μπορεί να επιλέξει να σώσει τα δεδομένα σε διαφορετικό φάκελο στον οποίο είχαν ανακτηθεί πριν επιστρέψει στο *Main menu* (FAO, 2012).

Πίνακας προσομοίωσης



(FAO, 2012)



(FAO, 2012)

3.8 Κλιματικά δεδομένα

Για κάθε ημέρα της περιόδου προσομοίωσης, το Aquacrop απαιτεί μια ελάχιστη και μια μέγιστη θερμοκρασία αέρα, εξατμισοδιαπνοή αναφοράς (ET_0), βροχόπτωση και μέση ετήσια συγκέντρωση CO_2 της ατμόσφαιρας. Τα κλιματικά δεδομένα έχουν ανακτηθεί από φακέλους που περιέχουν ημερήσια, 10-ήμερα ή μηνιαία δεδομένα. Τα επιλεγμένα κλιματικά δεδομένα εμφανίζονται στο *Display of climate characteristics* και μπορούν να ενημερωθούν στο *Climatic data* μενού (FAO, 2012).

Ελάχιστη και μέγιστη θερμοκρασία αέρα

Τα δεδομένα της θερμοκρασίας χρησιμοποιούνται για να υπολογίζουν τους βαθμούς θερμοκρασίας την ημέρα οι οποίοι καθορίζουν την ανάπτυξη της καλλιέργειας και τη φαινολογία και τη προσαρμογή της παραγωγής βιομάζας κατά τη διάρκεια των ψυχρών περιόδων που προκαλούν καταστροφές στη καλλιέργεια. Σε περίπτωση απουσίας καθημερινών δεδομένων τότε η είσοδος αποτελείται από 10-ήμερα ή μηνιαία δεδομένα και το πρόγραμμα χρησιμοποιεί μια διαδικασία παρεμβολής προκειμένου να αποκτήσει καθημερινά δεδομένα θερμοκρασίας από τα μέσα 10-ήμερα ή μηνιαία δεδομένα (FAO, 2012).

Η ημερήσια ελάχιστη θερμοκρασία αέρα (T_n) και η ημερήσια μέγιστη θερμοκρασία αέρα (T_x) είναι η αντίστοιχη ελάχιστη και μέγιστη θερμοκρασία αέρα παρατηρούμενη κατά τη διάρκεια 24 ωρης περιόδου ξεκινώντας από τα μεσάνυχτα. T_n και T_x είναι για 10-ήμερα ή μηνιαία δεδομένα, είναι οι μέσες ημερήσιες τιμές (FAO, 2012).

Εξατμισοδιαπνοή αναφοράς (ET_o)

Η Εξατμισοδιαπνοή αναφοράς συμβολίζεται με το ET_o και χρησιμοποιείται στο Aquacrop σαν μέτρο απαίτησης εξάτμισης από την ατμόσφαιρα. Είναι η αναλογία εξατμισοδιαπνοής από την επιφάνεια και όχι έλλειψη νερού. Ένα τεράστιο ομοιόμορφο τμήμα γρασιδιού (ή alfalfa) θεωρείται παγκοσμίως επιφάνεια. Η καλλιέργεια καλύπτει πλήρως το έδαφος, είναι καλά ποτισμένη και αναπτύσσεται κάτω από αγρονομικές-γεωπονικές συνθήκες (FAO, 2012).

Τα δεδομένα της Εξατμισοδιαπνοής αναφοράς (ET_o) μπορεί να προέρχονται από μετεωρολογικό σταθμό μέσω της εξίσωσης FAO Penman-Monteith και γι' αυτό είναι διαθέσιμος ένας τρόπος υπολογισμού του ET_o γιαυτό το σκοπό. Μέσα στον υπολογιστή αυτό, τα δεδομένα από ένα μετεωρολογικό σταθμό μπορούν να προσδιοριστούν σε μια μεγάλη ποικιλία από μονάδες, μετεωρολογικά δεδομένα μπορούν να εισαχθούν, διαδικασίες είναι διαθέσιμες να προσεγγίσουν χαμένα κλιματικά δεδομένα και η υπολογισμένη εξατμισοδιαπνοή αναφοράς εξάγεται στο Aquacrop (FAO, 2012).

Σε απουσία ημερήσιων κλιματικών δεδομένων, η είσοδος αποτελείται από 10-ήμερα ή μηνιαία δεδομένα και το πρόγραμμα χρησιμοποιεί μια διαδικασία παρεμβολής για να αποκτήσει την ημερήσια εξατμισοδιαπνοή αναφοράς (ET_o) από τους μέσους των 10-ήμερων ή μηνιαίων δεδομένων (FAO, 2012).

Βροχόπτωση

Βροχόπτωση είναι η ποσότητα του νερού που συλλέγεται στα βροχόμετρα τα οποία είναι εγκατεστημένα σε ένα πεδίο ή καταγράφεται σε ένα κοντινό μετεωρολογικό σταθμό. Για βροχόπτωση με εξαιρετικά ανομοιογενή κατανομή με τη πάροδο του χρόνου, η χρήση μακροπρόθεσμων μέσων δεδομένων δεν συνίσταται. Σε περίπτωση που δεν είναι διαθέσιμα ημερήσια δεδομένα βροχόπτωσης, 10-ήμερα και μηνιαία δεδομένα μπορούν να χρησιμοποιηθούν σαν είσοδος (FAO, 2012).

3.9 Χαρακτηριστικά καλλιέργειας

Τα χαρακτηριστικά της καλλιέργειας που απαιτούνται από το πρόγραμμα μπορούν να εμφανιστούν στο *Display of crop characteristics* μενού (Εικ.3.9a). Ο αριθμός και ο τύπος παραμέτρων καλλιέργειας ποικίλλει ελαφρώς με τους τύπους καλλιεργειών που επιλέχθηκαν όταν δημιουργείται μια καινούργια καλλιέργεια στο Aquacrop. Διάκριση γίνεται μεταξύ:

- Φρούτων/σιτηρών καλλιέργειας (με περίοδο σχηματισμού απόδοσης, ξεκινώντας κατά την ανθοφορία κατά τη διάρκεια της συγκομιδής);
- Φυλλώδη λαχανικά καλλιέργειας (όπου δε θεωρείται πληροφορία η ανθοφορία και η συγκομιδή ξεκινάει από την βλάστηση).
- Ριζών και κονδύλων καλλιέργειας (περίοδος σχηματισμού απόδοσης, ξεκινώντας με το σχηματισμό κονδύλων ή διεύρυνση ρίζας κατά τη διάρκεια της συγκομιδής).
- Κτηνοτροφικών φυτών (καλλιέργειες που υποβάλλονται σε κόψιμο περισσότερες από μία φορές το χρόνο ενδεχομένως προκαλούν μερικά από τα χαρακτηριστικά των καλλιεργειών που πρέπει να αλλάξουν μετά από ένα κόψιμο) (FAO, 2012).

- **Άνθιση και απόδοση παραγωγής:**

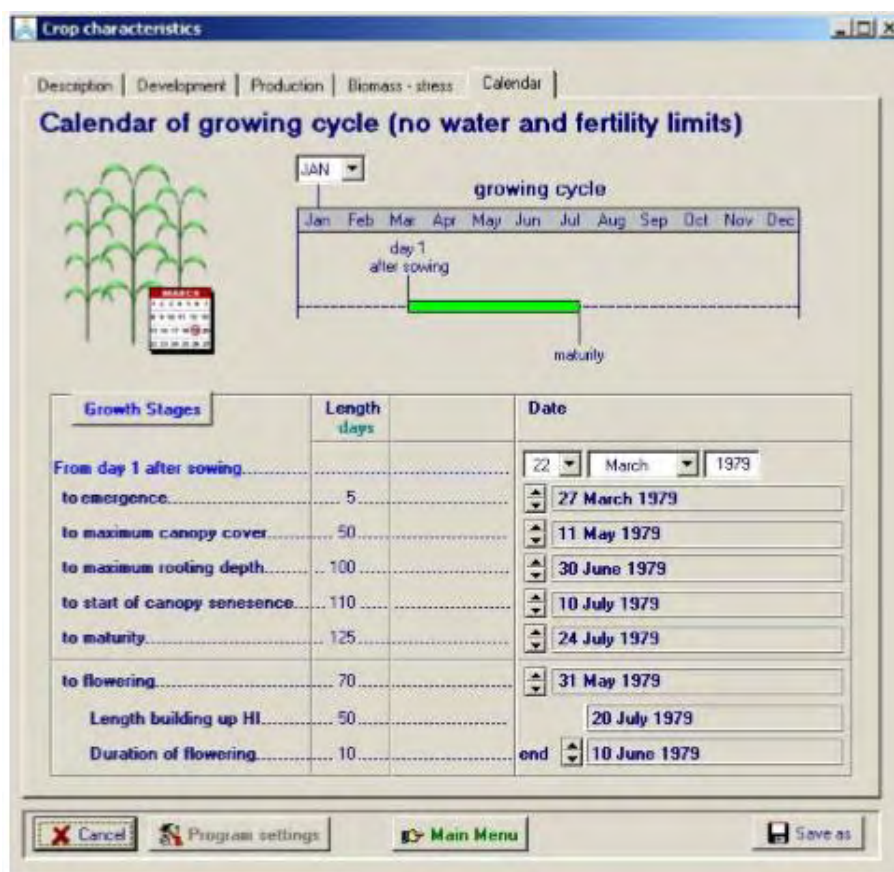
α) χρόνος έναρξης άνθισης β) διάρκεια άνθισης γ) ο χρόνος που απαιτείται να δημιουργηθεί ο δείκτης συγκομιδής δ) καθοριστικοί παράγοντες που συνδέονται με την ανθοφορία (FAO, 2012).

Ο χρόνος που απαιτείται για το δείκτη συγκομιδής για να αυξηθεί από το 0 (ανθοφορία) μέχρι τις τιμές αναφοράς (HI_0) κάτω από κανονικές συνθήκες εξαρτάται από τη διάρκεια του HI . Ο δείκτης συγκομιδής θα πρέπει να είναι σε θέση να φθάσει την τιμή αναφοράς του κατά ή λίγο πριν τη λήξη (FAO, 2012).

Το αποτελεσματικό βάθος ριζοβολίας δε θα μπορούσε να φτάσει τη μέγιστη τιμή του αν το στρώμα του εδάφους μπλοκάρει την ανάπτυξη των ριζών ή όταν το εκμεταλλεύσιμο βάθος του εδάφους είναι μικρότερο από το μέγιστο βάθος του ριζικού συστήματος. Η επέκταση του ριζικού συστήματος περιγράφεται από το παράγοντα σχήματος αλλά μόλις το αποτελεσματικό βάθος ριζοβολίας φθάσει στο περιορισμένο στρώμα εδάφους, η επέκταση σταματά (FAO, 2012).

3.10 Ημερολόγιο

Μια επισκόπηση του ημερολογίου της καλλιεργητικής περιόδου εμφανίζεται στο φάκελο ημερολόγιο από το μενού *Crop characteristics* (Εικ. 3.10).



Εικόνα 3.10: Ημερολόγιο καλλιεργείας με την ένδειξη σταδίων ανάπτυξης του FAO-56 (<http://11>)

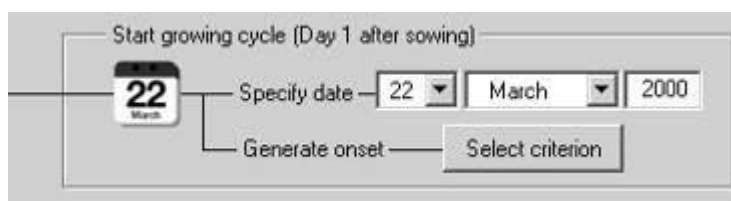
Στο ημερολόγιο μπορεί επίσης να εμφανίζεται η διάρκεια των σταδίων ανάπτυξης των καλλιεργειών. Τα στάδια αναφέρονται σε ορισμούς που χρησιμοποιούνται σε παλαιότερες εκδόσεις του FAO (Irrigation and Drainage Papers Nr. 24, 33 and 56) και είναι:

- Το **αρχικό στάδιο** ξεκινά στη σπορά και σταματά όταν η φυλλική επιφάνεια είναι 10% (CC = 0,10)?
- Το **στάδιο ανάπτυξης θόλου** ξεκινάει όταν η φυλλική επιφάνεια είναι μεγαλύτερη από 10% και σταματά όταν το 98% της μέγιστης φυλλικής επιφάνειας έχει επιτευχθεί (CC = 0,98 CCX).
- Το **στάδιο στα μέσα της σεζόν** ξεκινά, όταν ο θόλος φθάνει 0,98 CCX και σταματά όταν η γήρανση αρχίζει. Το τέλος του σταδίου δίνεται από τον χρόνο για να φθάσουν στη γήρανση.
- Το **στάδιο αργής σεζόν** ξεκινά όταν οι ημέρες φθάσουν στη γήρανση και σταματά τη στιγμή που έχει επιτευχθεί ωρίμανση στην καλλιέργεια, και η καλλιέργεια είναι έτοιμη να συγκομισθεί (FAO, 2012).

3.11 Έναρξη καλλιεργητικού κύκλου

Η έναρξη του καλλιεργητικού κύκλου καθορίζεται στο *Main menu* (Εικ 3.11a) από:

- Προσδιορίζοντας την ημερομηνία, ή
- Δημιουργώντας μια ένδειξη που βασίζεται στις βροχοπτώσεις ή τη θερμοκρασία (FAO.2012).



Εικόνα 3.11a: Πίνακας στο Main menu όπου προσδιορίζεται η έναρξη του καλλιεργητικού κύκλου (<http://12>)

Προσδιορισμένη ημερομηνία

Ο χρήστης καθορίζει την πρώτη ημέρα της παρατηρούμενης ή προγραμματισμένης έναρξης του καλλιεργητικού κύκλου (δηλαδή την πρώτη ημέρα μετά τη σπορά ή τη φύτευση). Εάν τα επιλεγμένα κλιματικά δεδομένα που συνδέονται με συγκεκριμένο έτος, η έναρξη της καλλιεργητικής περιόδου συνδέεται επίσης με το εν λόγω έτος. Αν τα κλιματικά δεδομένα αποτελούνται από πολλά χρόνια, η περίοδος ανάπτυξης του καλλιεργητικού κύκλου λαμβάνει χώρα κατά το πρώτο έτος της. Το έτος μπορεί να ρυθμιστεί στον πίνακα (FAO, 2012).

Δημιουργία έναρξης

Έναρξη βασισμένη στη βροχόπτωση

Σε ξηρικές καλλιέργειες, για σπορά ή φύτευση συνήθως καθορίζεται από βροχοπτώσεις. Με κλικ στο <*Select criterion*>στο *Main menu*, η εμφάνιση βασίζεται στο **Onset based on rainfall**. Επιλέγοντας ένα ή άλλο κριτήριο, η αρχή του καλλιεργητικού κύκλου καθορίζεται από την αξιολόγηση των δεδομένων βροχόπτωσης που καθορίζονται στο επιλεγμένο αρχείο δεδομένων βροχής. Καθορίζοντας την πρώτη και την τελευταία ημέρα σε ένα «παράθυρο αναζήτησης», αξιολογούνται οι βροχοπτώσεις εντός καθορισμένου παραθύρου (FAO, 2012).

Τα ακόλουθα κριτήρια μπορούν να επιλεγούν για να καθορίσουν την έναρξη του καλλιεργητικού κύκλου:

- Αθροιστική βροχόπτωση από την έναρξη της περιόδου αναζήτησης είναι ίση με ή υπερβαίνει τη προκαθορισμένη τιμή?
- Παρατηρούνται βροχοπτώσεις κατά τη διάρκεια ενός αριθμού διαδοχικών ημερών είναι ίση με ή υπερβαίνει τη προκαθορισμένη τιμή?
- 10-ήμερη βροχόπτωση είναι ίση με ή υπερβαίνει την προκαθορισμένη τιμή?
- 10-ήμερη βροχόπτωση υπερβαίνει το προκαθορισμένο κλάσμα του 10-ήμερου ET₀.

Οι δύο τελευταίες επιλογές είναι ιδιαίτερα χρήσιμες αν μόνο η 10-ήμερη ή μηνιαία βροχόπτωση είναι διαθέσιμες (FAO, 2012).

Η πρώτη εμφάνιση της ημερομηνίας έναρξης είναι η πρώτη ημερομηνία για την οποία το επιλεγμένο κριτήριο κατέχει. Τα επόμενα 10 περιστατικά εμφάνισης ημερών εμφανίζονται όταν κάνετε κλικ στην εντολή <**Next days**>. Όταν η έναρξη της εποχής των βροχών δεν είναι σίγουρη κατά την πρώτη εμφάνιση του επιλεγμένου κριτηρίου, επιλέγοντας μία από τις επόμενες επιλογές ή καθορίζοντας ένα αυστηρότερο κριτήριο τότε θα μπορούσε να αποφευχθεί η πρόωρη γήρανση φυλλικής επιφάνειας και μια πλήρη αποτυχία των καλλιεργειών μετά τη βλάστηση (FAO, 2012).

Έναρξη βασισμένη στην θερμοκρασία του αέρα

Η αλλαγή του κλίματος είναι πιθανό να αυξήσει τη θερμοκρασία του αέρα σε πολλές περιοχές. Για να εκτιμηθούν οι ημερομηνίες φύτευσης για τα επόμενα έτη για τις εαρινές καλλιέργειες σε ψυχρά κλίματα, το AquaCrop προσφέρει τη δυνατότητα να δημιουργήσει την ημερομηνία σποράς /

φύτευσης με βάση τη θερμοκρασία του αέρα. Επιλέγοντας το ένα ή το άλλο κριτήριο, τη πιθανότερη ημερομηνία φύτευσης / σποράς βασίζεται από την αξιολόγηση του αέρα, τα δεδομένα θερμοκρασίας που ορίζεται στο αρχείο δεδομένων του επιλεγμένου αρχείου «**Θερμοκρασία του αέρα**» (FAO, 2012). Καθορίζοντας τη πρώτη και την τελευταία ημέρα στο «Search window», μόνο τα δεδομένα θερμοκρασίας εντός του καθορισμένου παραθύρου αξιολογούνται (Εικ. 3.11.c).

Τα ακόλουθα κριτήρια μπορούν να επιλεγούν για να προσδιοριστεί η έναρξη του καλλιεργητικού κύκλου που βασίζεται στη θερμοκρασία του αέρα:

A) Η ημερήσια ελάχιστη θερμοκρασία του αέρα, σε κάθε ημέρα ενός δεδομένου αριθμού διαδοχικών ημερών, είναι ίση με ή υπερβαίνει μια ορισμένη ελάχιστη θερμοκρασία του αέρα.

B) Η μέση ημερήσια θερμοκρασία του αέρα, σε κάθε ημέρα ενός δεδομένου αριθμού διαδοχικών ημερών, είναι ίση ή υπερβαίνει μια ορισμένη μέση θερμοκρασία του αέρα.

Γ) Το άθροισμα των βαθμών καλλιέργειας σε ένα δεδομένο αριθμό διαδοχικών ημερών είναι ίσο ή υπερβαίνει τις καθορισμένες ημέρες αυξανόμενων βαθμών καλλιέργειας..

Δ) Οι αθροιστικοί βαθμοί καλλιέργειας από την έναρξη της περιόδου αναζήτησης είναι ίσοι ή υπερβαίνουν τους ημερήσιους βαθμούς καλλιεργειών.

Η πρώτη εμφάνιση της ημερομηνίας έναρξης είναι η πρώτη ημερομηνία για την οποία το επιλεγμένο κριτήριο παραμένει. Οι επόμενες 10 ενάρξεις ημερών εμφανίζονται όταν κάνετε κλικ στην εντολή <**Next days**> (FAO, 2012).

3.12 Διαχείριση Άρδευσης

Η επιλεγμένη διαχείριση άρδευσης μπορεί να εμφανίζεται στο μενού **Display of irrigation management** και να ενημερώνεται στο μενού **Irrigation management**. Διάφοροι τρόποι άρδευσης μπορούν να θεωρηθούν στο AquaCrop. Μια επιλογή είναι για (i) ξηρικές καλλιέργειες (όχι άρδευση στην εποχή), (ii) στον προσδιορισμό για απαίτηση καθαρού νερού άρδευσης (iii) ένα πρόγραμμα άρδευσης, καθορίζοντας τα γεγονότα ή (iv) ένα πρόγραμμα άρδευσης προσδιορίζοντας τον χρόνο και το βάθος σαν κριτήρια (FAO, 2012).



Εικόνα 3.12α: Η επιλογή του τρόπου στο μενού *Διαχείρισης Αρδεύσεων* (<http13>)

Υπολογισμός καθαρού νερού άρδευσης

Όταν επιλέγεται αυτή η επιλογή, το AquaCrop θα υπολογίσει κατά τη διάρκεια της προσομοίωσης τη ποσότητα του νερού που απαιτείται για να αποφευχθεί το στρες της καλλιέργειας από την έλλειψη νερού. Όταν η εξάντληση της ζώνης του ριζικού συστήματος υπερβαίνει μια δεδομένη τιμή κατωφλίου (50% του RAW είναι η προεπιλογή), μια μικρή ποσότητα του νερού άρδευσης θα πρέπει να αποθηκεύεται στο προφίλ εδάφους για να κρατήσει την εξάντληση ριζικού ακριβώς πάνω από το καθορισμένο όριο. Το όριο για την επιτρεπόμενη εξάντληση της ριζικής ζώνης μπορεί να ρυθμιστεί (FAO, 2012).

Η συνολική ποσότητα του νερού άρδευσης που απαιτείται για να κρατήσει το περιεχόμενο νερό στη διατομή του εδάφους πάνω από το όριο είναι η καθαρή απαίτηση νερού άρδευσης για την περίοδο. Το δίκτυο δεν απαιτεί επιπλέον νερό που πρέπει να εφαρμοστεί στο πεδίο για να αντιπροσωπεύουν μεταφορά των ζημιών ή η άνιση κατανομή του νερού άρδευσης στο οικόπεδο (FAO, 2012).

Πρόγραμμα Άρδευσης (προσδιορισμένα γεγονότα)

Ο χρήστης καθορίζει την ημερομηνία, βάθος εφαρμογής και την ποιότητα του νερού για κάθε περίπτωση άρδευσης (Εικ. 3.12b). Το βάθος άρδευσης αναφέρεται στο καθαρό ποσό της άρδευσης. Εφαρμόζεται επιπλέον νερό στο πεδίο για να καλυφθούν οι απώλειες μεταφοράς ή την άνιση κατανομή του αρδευτικού νερού, στο πεδίο δεν θα πρέπει να προστεθεί (FAO, 2012).

Event	Date	Day No.	Net application (mm)	dS/m
1	31 March 2000	10	50	1.0
2	10 April 2000	20	50	1.0
3	20 April 2000	30	50	1.0
4	30 April 2000	40	50	1.2
5	10 May 2000	50	50	1.4
6	20 May 2000	60	50	1.6
7	9 June 2000	80	50	1.8
8				

Εικόνα 3.12b: Προσδιορισμός του χρόνου, βάθος εφαρμογής και ποιότητα νερού για αρδεύσεις (<http://14>)

Δημιουργία προγραμμάτων άρδευσης

Κατά το χρόνο εκτέλεσης μπορούν να δημιουργηθούν αρδεύσεις καθορίζοντας το χρόνο και το βάθος σαν κριτήρια. Το κριτήριο του χρόνου καθορίζει «Πότε», μια άρδευση πρέπει να εφαρμοστεί, ενώ το κριτήριο βάθους καθορίζει «Πόσο», νερό πρέπει να εφαρμοστεί. Μετά την επιλογή των κριτηρίων, οι τιμές σχετίζονται με το χρόνο, το βάθος και τη ποιότητα του νερού που πρέπει να προσδιορίζονται (Εικ. 3.12c). Οι τιμές που αναφέρονται σε μια συγκεκριμένη ημέρα της καλλιεργητικής περιόδου θα ισχύουν μέχρι την ημερομηνία που έχει καθοριστεί κάποια άλλη τιμή ή στο τέλος της καλλιεργητικής περιόδου, όταν δεν υπάρχουν τιμές σε μεταγενέστερες ημερομηνίες που καθορίζονται. Ως εκ τούτου μπορεί κανείς να ρυθμίσει τις τιμές για την ανάπτυξη των καλλιεργειών ή το χρόνο στη σεζόν. Παρουσιάζονται τα χρονοδιαγράμματα άρδευσης όπως ορίζεται στο σχήμα 3.12a (FAO, 2012).

Generation of irrigation schedule

Mode | Irrigation method | Time and Depth criteria

Time Criteria

- ☒ Fixed interval
- ☐ Allowable depletion (mm water)
- ☐ Allowable depletion (% of RAW)

Depth Criteria

- ☐ Back to Field Capacity
- ☒ Fixed net application

Irrigation water quality

good

EC_w 0.5 dS/m

assign

Day No. 1 - day 1 after sowing: 22 March 1979

Date	Day No.	Interval (days)	Depth (mm)	Quality
22 March 1979	1	40	40	0.4
1 May 1979	41	7	40	0.6
15 July 1979	116	100	40	0.8

Day No. 125 - maturity: 24 July 1979

Clear All Events

Cancel Main Menu Save on disk

Εικόνα 3.12c: Προσδιορίζοντας το πρόγραμμα άρδευσης όπου το χρονικό διάστημα που καθορίζεται για άρδευση (κριτήριο χρόνο) μεταβάλλεται κατά τη διάρκεια της σεζόν ενώ το βάθος εφαρμογής σταθερής αρδεύσεως (κριτήριο βάθους) παραμένει σταθερό, και η ποιότητα του νερού άρδευσης χειροτερεύει (http15)

no irrigation		irrigation interval: 7 days applied irrigation amount: 40 mm		no irrigation	
DNr 1 22 March sowing	DNr 41 1 May			DNr 116 15 July	DNr 125 24 July maturity

Σχ: 3.12a: Χρονοδιαγράμματα άρδευσης όπως ορίζεται στην Εικόνα 3.12c (http16)

Μέθοδος Άρδευσης

Πολλοί τύποι συστημάτων άρδευσης υγραίνουν μόνο ένα κλάσμα της επιφάνειας του εδάφους. Δεδομένου ότι ένα μέρος μόνο της επιφάνειας του εδάφους υγραίνεται, λιγότερο νερό εξατμίζεται από την επιφάνεια του εδάφους μετά από την άρδευση. Με την επιλογή μιας μεθόδου άρδευσης, μια ενδεικτική τιμή για το κλάσμα της επιφάνειας του εδάφους που διαβρέχεται έχει εκχωρηθεί (Πίνακας 3.12.1). Ο χρήστης μπορεί να αλλάξει την τιμή, αν πληροφορίες είναι διαθέσιμες από παρατηρήσεις πεδίου (FAO, 2012).

Πίνακας 3.12.1: Ενδεικτικές τιμές για το κλάσμα της υγρής επιφάνειας του εδάφους για διάφορες μεθόδους άρδευσης

Irrigation method	Soil surface wetted (%)
Sprinkler irrigation	100
Basin irrigation	100
Border irrigation	100
Furrow irrigation (every furrow), narrow bed	60 – 100
Furrow irrigation (every furrow), wide bed	40 – 60
Furrow irrigation (alternated furrows)	30 – 50
Trickle/Drip - Micro irrigation	15 – 40
Subsurface drip irrigation	0

Ποιότητα νερού άρδευσης

Δεδομένου ότι η ποιότητα του νερού άρδευσης μπορεί να αλλάξει κατά τη διάρκεια της περιόδου, θα πρέπει να προσδιορίζονται για κάθε περίπτωση άρδευσης (3.12.1). Η ποιότητα εκφράζεται από την ηλεκτρική αγωγιμότητα του νερού άρδευσης (EC_w) σε deciSiemens ανά μέτρο (dS / m). Όταν η ποιότητα του νερού άρδευσης παραμένει σταθερή στη διάρκεια του κύκλου της καλλιέργειας, η συνεχής EC_w μπορεί να εκχωρηθεί για όλες τις περιπτώσεις άρδευσης. Ενδεικτικές τιμές για EC_w για διάφορες κατηγορίες αρδευτικού νερού παρατίθενται στον Πίνακα 3.12.2 (FAO, 2012).

Πίνακας 3.12.2: Ενδεικτικές τιμές για την ποιότητα του νερού άρδευσης (EC_w)

Range of EC_w Electrical Conductivity (dS/m)	Class Quality of irrigation water
0.0 ... 0.2	excellent
0.3 ... 1.0	good
1.0 ... 2.0	moderate
2.1 ... 3.0	poor
> 3.0	very poor

3.13 Χαρακτηριστικά Εδαφικού προφίλ

Τα επιλεγμένα χαρακτηριστικά του εδάφους και επιφανειακού στρώματος με παρουσία περιοριστικού στρώμα χώματος μπορεί να φράξουν την επέκταση ριζικού συστήματος και η μέγιστη

πιθανή μπορεί να εμφανιστεί στο μενού *Display of soil profile characteristics* και να ενημερωθεί στο μενού *Soil profile characteristics* (FAO, 2012).

Ενδεικτικές τιμές για τα φυσικά χαρακτηριστικά του εδάφους

Η ποσότητα του νερού που παραμένει στο έδαφος σε κορεσμό και το πεδίο χωρητικότητας ποικίλλει ανάλογα με την υφή του εδάφους, του επιπέδου οργανικής ύλης και της δομής. Η άργιλος και το περιεχόμενο της οργανικής ύλης του εδάφους καθορίζουν κυρίως σε περιεκτικότητα το νερό του εδάφους της στο σημείο μαρασμού. Η κορεσμένη υδραυλική αγωγιμότητα (K_{sat}) μεταβάλλεται όχι μόνο μεταξύ των διαφόρων τύπων εδάφους, αλλά ακόμη και για ένα συγκεκριμένο τύπο του εδάφους. Μια τυπική τιμή K_{sat} δεν υπάρχει. Ακόμη και σε ένα μόνο πεδίο, δεν είναι ασυνήθιστο να μετρηθούν σημαντικές μεταβολές για K_{sat} στο χώρο και το χρόνο, ως αποτέλεσμα μεταβολών στη δομή του εδάφους, τη πυκνότητα, τη βιολογική δραστηριότητα και την διαχείριση του εδάφους (FAO, 2012).

Ο χρήστης μπορεί να κάνει χρήση ενδεικτικών τιμών που παρέχονται από το Aquacrop για κατηγορίες εδαφών (Πίνακας 3.13a) ή να εισάγει τοπικά δεδομένα ή να ανακτήσει δεδομένα με τη βοήθεια λειτουργιών πεδο-μεταφοράς. Οι τιμές που παρουσιάζονται στο Πίνακα 3.13a ή ανακτώνται με τη βοήθεια λειτουργιών πεδο-μεταφοράς είναι μόνο ενδεικτικές τιμές. Δεν έχουν σκοπό να αντικαταστήσουν τις μετρήσεις (FAO, 2012).

Επιλέγοντας την εντολή *<Update list of soil type characteristics>* στο μενού *Soil Profile Characteristics*, οι ενδεικτικές τιμές για τα υδραυλικά χαρακτηριστικά του εδάφους μπορεί να ενημερώνονται και οι τύποι εδάφους μπορούν να προστεθούν ή να αφαιρεθούν από τον κατάλογο. Τα χαρακτηριστικά αποθηκεύονται στο φάκελο 'SOILS.DIR' του καταλόγου Aquacrop (FAO, 2012).

Πίνακας 3.13a: Προεπιλεγμένα φυσικά χαρακτηριστικά εδάφους για ποικίλους τύπους εδαφών (Soils.DIR)

Soil type	soil water content			Saturated hydraulic conductivity mm/day
	Saturation vol %	Field Capacity vol %	Permanent Wilting Point vol %	
Sand	36	13	6	1500
Loamy sand	38	16	8	800
Sandy loam	41	22	10	500
Loam	46	31	15	250
Silt loam	46	33	13	150
Silt	43	33	9	50
Sandy clay loam	47	32	20	125
Clay loam	50	39	23	100
Silty clay loam	52	44	23	120
Sandy clay	50	39	27	75
Silty clay	54	50	32	15
Clay	55	54	39	2

Χαρακτηριστικά επιφανειακού στρώματος εδάφους

Όταν προσδιορίζουμε τα δεδομένα εδάφους για τον ανώτατο ορίζοντα, τις προεπιλεγμένες τιμές (Πίνακας 3.13b) και το Άμεσα Εξατμιζόμενο Νερό.

- Ο Curve Number (CN) απαιτείται για τη προσομοίωση της επιφανειακής απορροής και η αξία του αναφέρεται σε αξίες για προγενέστερες κατηγορίες II (AMC II).

- Το Άμεσα Εξατμιζόμενο Νερό (REW) εκφράζει τη ποσότητα νερού που μπορεί να εξατμιστεί από το στρώμα της επιφάνειας του εδάφους σε ενεργειακό περιοριστικό στάδιο. Ο χρήστης μπορεί να προσδιορίσει άλλες από τις εμφανιζόμενες προεπιλεγμένες τιμές για τον CN και REW αν συγκεκριμένες πληροφορίες για την επιφάνεια του εδάφους είναι διαθέσιμες (FAO, 2012).

Πίνακας 3.13b: Προεπιλεγμένες τιμές CN για ποικίλες υδραυλικές αγωγιμότητες για τον ανώτατο ορίζοντα

Saturated hydraulic conductivity (K_{sat}) mm/day	CN default value for AMC II
> 250	65
250 – 50	75
50 – 10	80
< 10	85

Τριχοειδής ανύψωση

Στο φύλλο τριχοειδής ανύψωση ο χρήστης μπορεί να μελετήσει τη μέγιστη δυνατή ροή προς τα επάνω για διάφορα βάθη του πίνακα υπόγειων υδάτων. Αν το δυναμικό της κλίσης νερού στη διατομή εδάφους δεν είναι αρκετά ισχυρό τότε η τριχοειδής ανύψωση θα είναι μικρότερη από αυτή που αναφέρεται (FAO, 2012).

Η μέγιστη δυνατή τριχοειδής ανύψωση υπολογίζεται με μια εκθετική εξίσωση. Οι προεπιλεγμένοι a και b παράμετροι, που περιγράφουν την τριχοειδή ανύψωση για κάθε ορίζοντα του εδάφους, λαμβάνονται με την εξέταση του τύπου του εδάφους και τη κορεσμένη υδραυλική αγωγιμότητα. Με τα κουμπιά αυξομείωσης ο χρήστης μπορεί να ρυθμίσει τις παραμέτρους a και b για κάθε ορίζοντα του εδάφους για να ταιριάζει με την παρατηρούμενη μέγιστη δυνατή ανοδική ροή με την προσομοιωμένη και απεικονιζόμενη τριχοειδή ανύψωση. Με την επιλογή του πλήκτρου **<Parameters>**, οι βαθμονομημένες και προεπιλεγμένες τιμές για τις παραμέτρους a και b

εμφανίζονται. Με το χτύπημα στο πλήκτρο <Reset>, ο χρήστης αναιρεί τη βαθμονόμηση και οι παράμετροι a και b επαναφέρονται στις προεπιλεγμένες τιμές τους (FAO, 2012).

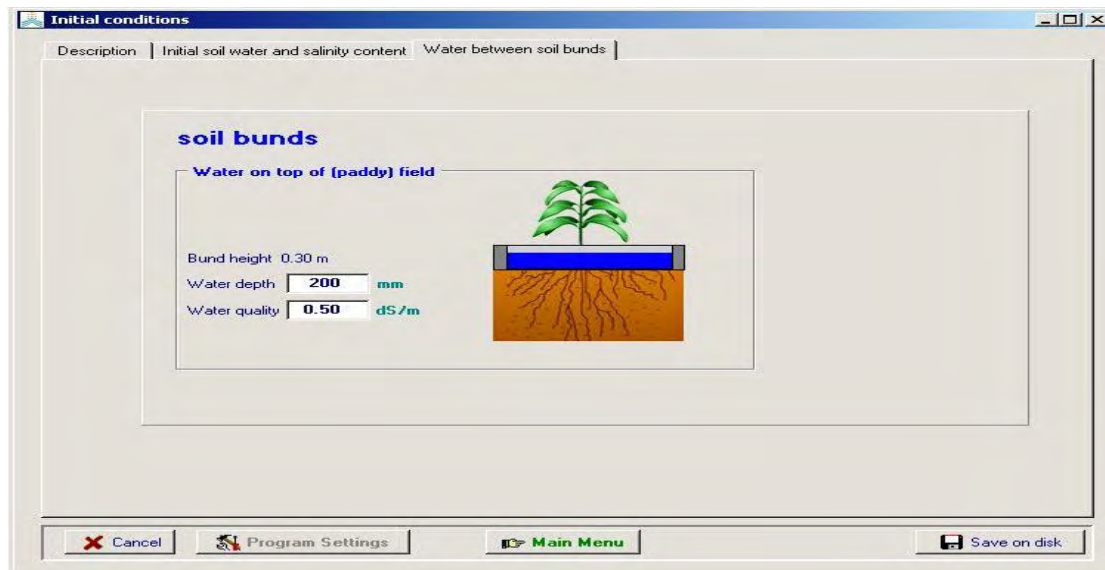
3.14 Αρχική περιεκτικότητα σε νερό του εδάφους

Η περιεκτικότητα σε νερό του εδάφους κατά την έναρξη της προσομοίωσης μπορεί να ρυθμιστεί (i) προσδιορίζοντας τη περιεκτικότητα του εδάφους σε νερό σε συγκεκριμένα βάθη του εδαφικού προφίλ, (ii) προσδιορίζοντας για συγκεκριμένα στρώματα, ή (iii) τον καθορισμό ολόκληρου του προφίλ του εδάφους σε κορεσμό, υδατοχωρητικότητα, Σημείο μαρασμού ή σε συγκεκριμένο ποσοστό των TAW (συνολικά διαθέσιμο νερό εδάφους) (FAO, 2012).

Οι αρχικές συνθήκες του νερού του εδάφους καθορίζονται έντονα από τις κλιματικές συνθήκες (ET_o και βροχής) και τις εφαρμογές άρδευσης κατά την περίοδο πριν από την περίοδο της προσομοίωσης. Εάν η περίοδος προσομοίωσης ξεκινά στο τέλος μιας πολύ βροχερής εποχής, η περιεκτικότητα σε νερό του εδάφους κάνει το προφίλ του εδάφους πολύ δυναμικό. Αν η προσομοίωση ξεκινά στην καυτή εποχή της ξηρασίας, η φυτική γη θα μπορούσε να είναι υγρή από την προ-άρδευση, αλλά το υπέδαφος θα είναι στεγνό και η περιεκτικότητα σε νερό κοντά στο σημείο μαρασμού (FAO, 2012).

Νερό ανάμεσα στα αναχώματα του εδάφους

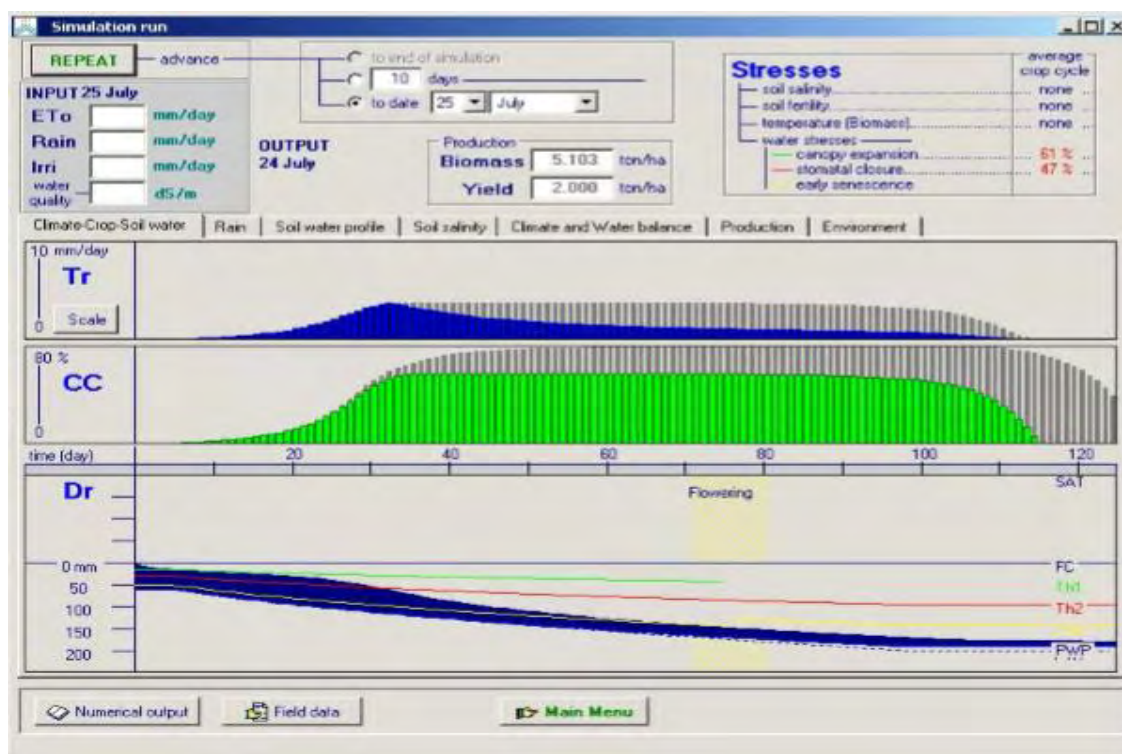
Αν το πεδίο είναι περιτριγυρισμένο από αναχώματα εδάφους το βάθος του στρώματος νερού πάνω από την επιφάνεια του εδάφους και των υδάτων του στην αρχή της προσομοίωσης μπορεί να προσδιοριστεί (Εικ. 3.14.1) (FAO, 2012).



Εικόνα 3.14.1: Προσδιορισμός του βάθους και της ποιότητας ανάμεσα στα αναχώματα του εδάφους κατά την έναρξη της περιόδου προσομοίωσης στο μενού *Initial condition* ([http17](http://17))

3.15 Αξιολόγηση αποτελεσμάτων προσομοίωσης

Όταν εκτελείται μια προσομοίωση, ο χρήστης μπορεί να αξιολογήσει τα αποτελέσματα προσομοίωσης με τη βοήθεια των δεδομένων πεδίου τα οποία είναι αποθηκευμένα σε αρχείο παρατήρησης. Ο χρήστης έχει πρόσβαση στο μενού *<Evaluation of simulation results>* (FAO, 2012).



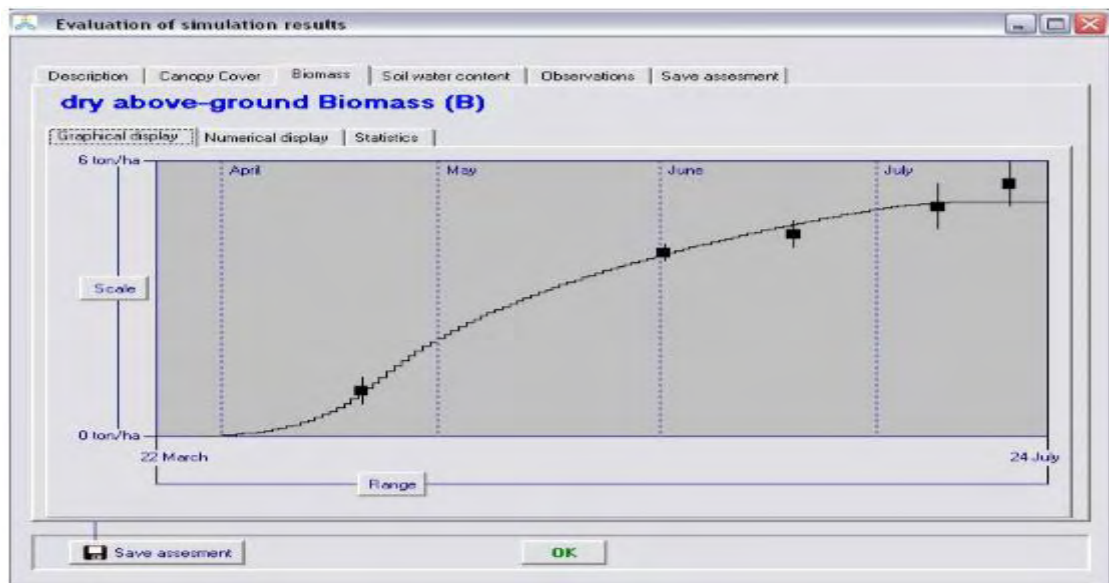
Εικόνα 3.15a: Το μενού *Simulation run* με την εντολή <Observations>στο πίνακα εντολών (http18)

Γραφικές και αριθμητικές απεικονίσεις

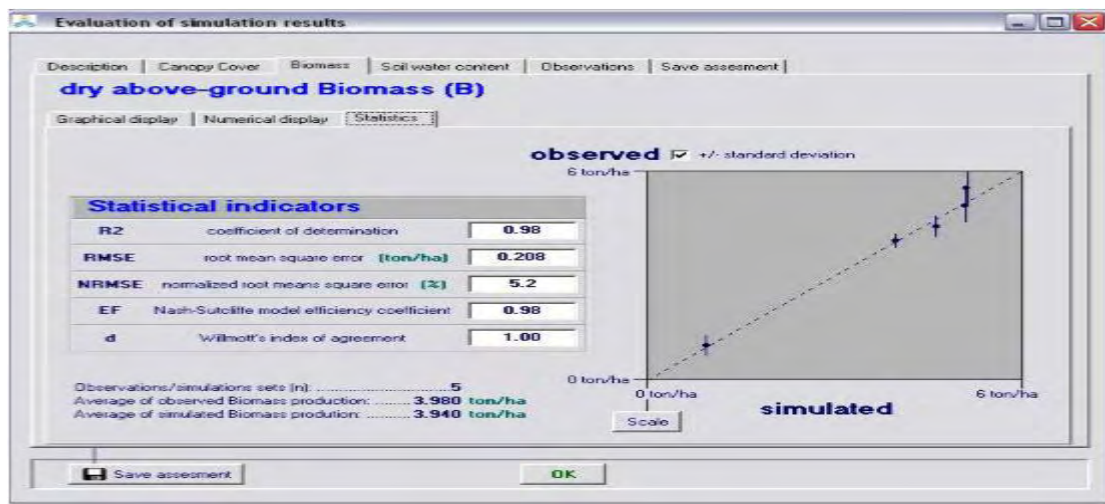
Για κάθε ένα από τα 3 σύνολα του αρχείου παρατηρήσεων (Φυλλική επιφάνεια, Βιομάζα και περιεκτικότητα σε νερό εδάφους) ο χρήστης βρίσκει στο μενού *Evaluation of simulation results* :

1. Μια γραφική απεικόνιση όπου οι προσομοιωμένες και παρατηρούμενες (με τις τυπικές αποκλίσεις τους) τιμές απεικονίζονται:
2. Μια αριθμητική απεικόνιση όπου οι προσομοιωμένες και παρατηρούμενες τιμές (με τις τυπικές αποκλίσεις τους) εμφανίζονται

3. Στατιστικοί δείκτες αξιολογούν τα αποτελέσματα προσομοίωσης (Εικ.3.15b). Η αξιολόγηση μπορεί να αποθηκευτεί στο δίσκο για χρήση αργότερα (FAO, 2012).



Εικόνα 3.15c: Προσομοιωμένη (γραμμή) και παρατηρούμενη (κουκκίδες) ξηρή υπέργεια βιομάζα με τις τυπικές αποκλίσεις τους (κάθετες γραμμές) στο μενού *Evaluation of simulation results* (<http19>)



Εικόνα 3.15b: Στατιστικοί δείκτες για την αξιολόγηση προσομοιωμένες ξηρής-υπέργειας βιομάζας στο μενού *Evaluation of simulation results* (<http20>)

3.16 Στατιστικοί δείκτες

Η αξιολόγηση της απόδοσης του μοντέλου είναι σημαντικό να παρέχει μια ποσοτική εκτίμηση της ικανότητας του μοντέλου να αναπαράγει μια παρατηρούμενη μεταβλητή, να αξιολογήσει την επίπτωση βαθμονόμησης παραμέτρων του μοντέλου και να συγκρίνει τα αποτελέσματα του υποδείγματος με προηγούμενες αναφορές (Krause et al., 2005). Αρκετοί στατιστικοί δείκτες είναι διαθέσιμοι να αξιολογήσουν τη κατάσταση του μοντέλου (Loague and Green, 1991). Ο καθένας έχει τα δικά του πλεονεκτήματα και τις αδυναμίες του, πράγμα που σημαίνει ότι η χρήση ενός συνόλου διαφορετικών δεικτών είναι απαραίτητη για την επαρκή αξιολόγηση των επιδόσεων του τρόπου πραγματοποίησης (Willmott, 1984; Legates and McCabe, 1999). Στις εξισώσεις 8.4a μέχρι 8.4e, O_i and P_i είναι οι παρατηρήσεις και οι προβλέψεις αντίστοιχα και οι μέσοι όροι είναι \bar{O} και \bar{P} και n ο αριθμός παρατηρήσεων (FAO, 2012).

Συντελεστής προσδιορισμού(R^2)

Ο συντελεστής προσδιορισμού r^2 ορίζεται ως η τετραγωνισμένη τιμή του συντελεστή συσχέτισης Pearson. r^2 σημαίνει το ποσοστό της διακύμανσης σε μετρήσεις δεδομένων σύμφωνα με το μοντέλο, ή μπορεί επίσης να ερμηνευθεί ως η αναλογία τετραγώνου μεταξύ συνδιασποράς και πολλαπλασιασμένων τυπικών αποκλίσεων των παρατηρήσεων και προβλέψεις. Ποικίλλει από 0 μέχρι το 1, με τιμές κοντά στο 1 να δείχνει μια καλή συμφωνία και τιμές μεγαλύτερες του 0,5 θεωρούνται τυπικά αποδεκτές σε προσομοιώσεις με καμπή (FAO, 2012).

$$r^2 = \left[\frac{\sum (O_i - \bar{O})(P_i - \bar{P})}{\sqrt{\sum (O_i - \bar{O})^2 \sum (P_i - \bar{P})^2}} \right]^2 \quad (8.4a)$$

Ένα σημαντικό μειονέκτημα της r^2 είναι ότι μόνο η διασπορά ποσοτικοποιείται, πράγμα που σημαίνει ότι ένα μοντέλο το οποίο υπερεκτιμά συστηματικά (ή υποτιμά) τις παρατηρήσεις, μπορεί να εξακολουθεί να έχει μια καλή τιμή r^2 (Krause et al., 2005). Willmott (1982) ανέφερε επίσης ότι στο πλαίσιο των ατμοσφαιρικών επιστημών τόσο r και r^2 είναι ανεπαρκείς και συχνά παραπλανητικές όταν χρησιμοποιούνται για την αξιολόγηση των επιδόσεων στο μοντέλο. Η ανάλυση του εναπομένοντος σφάλματος (η διαφορά μεταξύ του μοντέλου προβλέψεων και παρατηρήσεις: $P_i - O_i$) κρίνεται ότι περιέχει περισσότερο κατάλληλες και διορατικές πληροφορίες. (FAO, 2012).

Root Mean Square Error (RMSE)

Η ρίζα του μέσου τετραγωνικού σφάλματος ως RMSE είναι ένας από τους πιο ευρέως χρησιμοποιημένους στατιστικούς δείκτες (Jacovides and Kontoyiannis, 1995) και μετρά το μέσο μέγεθος της διαφοράς μεταξύ των προβλέψεων και των παρατηρήσεων. Κυμαίνεται από 0 έως +∞ με το πρώτο υποδεικνύοντας καλή και με το τελευταίο κακή απόδοση στο μοντέλο. Ένα μεγάλο πλεονέκτημα του RMSE είναι ότι συνοψίζει τη μέση διαφορά στις μονάδες της P και O. Ωστόσο, δε διαφέρουν μεταξύ στην υπερεκτίμηση και υποεκτίμηση (FAO, 2012).

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum (P_i - O_i)^2}{n}} \quad (8.4b)$$

Ένα μειονέκτημα του RMSE είναι το γεγονός ότι τα εναπομείναντα σφάλματα υπολογίζονται ως τετραγωνικές τιμές, οι οποίες έχουν το αποτέλεσμα ότι οι υψηλότερες τιμές σε μια δεδομένη χρονική σειρά δίνουν μεγαλύτερο βάρος σε σύγκριση με χαμηλότερες τιμές (Legates and McCabe, 1999) και η RMSE είναι εξαιρετικά ευαίσθητη σε ακραίες τιμές (Moriassi et al., 2007). Αυτό είναι στην πραγματικότητα μια αδυναμία όλων των στατιστικών δεικτών, όπου η διακύμανση είναι τετραγωνισμένη συμπεριλαμβανομένων των EF και Willmott's d , οι οποίες αναλύονται παρακάτω (FAO, 2012).

Normalized Root Mean Square Error (NRMSE)

Επειδή RMSE εκφράζεται σε μονάδες της υπό μελέτη μεταβλητής, δεν επιτρέπει τον έλεγχο μοντέλου κάτω από ένα ευρύ φάσμα μετεω-κλιματικών συνθηκών. Ως εκ τούτου, RMSE μπορεί να κανονικοποιηθεί χρησιμοποιώντας το μέσο της παρατηρούμενης μεταβλητής (ο). Η κανονικοποιημένη RMSE (RMSE) εκφράζεται ως ποσοστό επί τοις εκατό και δίνει μια ένδειξη της σχετικής διαφοράς μεταξύ μοντέλου και των παρατηρήσεων (FAO, 2012).

$$NRMSE = \frac{1}{\bar{O}} \sqrt{\frac{\sum (P_i - O_i)^2}{n}} 100 \quad (8.4c)$$

Η προσομοίωση μπορεί να θεωρηθεί εξαιρετική, αν RMSE είναι μικρότερη από 10%, καλή αν μεταξύ 10 και 20%, δίκαιη εάν μεταξύ 20 και 30% και κακή, εφόσον μεγαλύτερη από 30% (FAO, 2012).

Nash-Sutcliffe μοντέλο συντελεστή απόδοσης (EF)

Το μοντέλο Nash-Sutcliffe συντελεστή απόδοσης (EF) καθορίζει το σχετικό μέγεθος της διακύμανσης σε σχέση με τη διακύμανση των παρατηρήσεων (Nash and Sutcliffe, 1970). Με μια άλλη ματιά μπορούμε να πούμε ότι το EF δείχνει πόσο καλά το πεδίο των παρατηρήσεων εναντίων των προσομοιωμένων δεδομένων ταιριάζει με 1:1 γραμμή. Το EF 1 δείχνει μια τέλεια αντιστοιχία μεταξύ του μοντέλου και των παρατηρήσεων, το EF 0 σημαίνει ότι οι προβλέψεις του μοντέλου είναι τόσο ακριβείς όσο ο μέσος όρος των παρατηρούμενων δεδομένων και αρνητικό EF συμβαίνει όταν η μέση τιμή των παρατηρήσεων είναι καλύτερη πρόβλεψη από του μοντέλου.

$$EF = 1 - \frac{\sum (P_i - O_i)^2}{\sum (O_i - \bar{O})^2} \quad (8.4d)$$

Η EF χρησιμοποιείται πολύ συχνά, πράγμα που σημαίνει ότι υπάρχει ένας μεγάλος αριθμός των αναφερόμενων τιμών διαθέσιμες στη βιβλιογραφία (Moriassi et al., 2007). Ωστόσο, r^2 , EF δεν είναι πολύ ευαίσθητα στην συστηματική υπερεκτίμηση ή υποτίμηση από το μοντέλο (Krause et al., 2005) (FAO, 2012).

Willmott's index of agreement (d)

Ο δείκτης της συμφωνίας προτάθηκε από Willmott (1982) για τη μέτρηση του βαθμού στον οποίο τα παρατηρούμενα δεδομένα προσεγγίζονται από τα προβλεπόμενα δεδομένα. Αντιπροσωπεύει την αναλογία μεταξύ του μέσου τετραγωνικού σφάλματος και του «δυννητικού σφάλματος», η οποία ορίζεται ως το άθροισμα των τετραγώνων των απολύτων τιμών των αποστάσεων από τις προβλεπόμενες τιμές για τη μέση παρατηρούμενη τιμή και οι αποστάσεις από

τις παρατηρούμενες τιμές για τη μέση παρατηρούμενη τιμή (Willmott, 1984). Υπερνικά την έλλειψη ευαισθησίας των r^2 και EF σε συστηματική υπέρ- ή υποεκτίμησης από το μοντέλο (Legates and McCabe, 1999; Willmott, 1984). Κυμαίνεται μεταξύ 0 και 1, με 0 να δείχνει καμία συμφωνία και 1 δείχνει μια τέλεια συμφωνία μεταξύ των προβλεπόμενων και παρατηρούμενων δεδομένων (FAO, 2012).

$$d = 1 - \frac{\sum (P_i - O_i)^2}{\sum (|P_i - \bar{O}| + |O_i - \bar{O}|)^2} \quad (8.4e)$$

Ένα μειονέκτημα του d είναι ότι οι σχετικά υψηλές τιμές μπορούν να ληφθούν (πάνω από 0,65), ακόμη και όταν το μοντέλο έχει χαμηλή επίδοση, παρά τις προθέσεις του Willmott (1982), το d δεν είναι ακόμα πολύ ευαίσθητο σε συστηματική υπερτίμηση ή υποτίμηση (FAO, 2012).

4. Συγκρίσεις στις μεθόδους υπολογισμού της Εξατμισοδιαπνοής

Σε μερικές περιπτώσεις η χρήση της μεθόδου FAO PM είναι περιορισμένη λόγω έλλειψης εισόδου μεταβλητών. Η εξατμισοδιαπνοή έχει παρουσιάσει καλά αποτελέσματα όταν συγκρίνεται με δεδομένα από λυσίμετρα. Ο Thornthwaite (1948) περιέγραψε τη βιολογική και φυσική σημασία της εξατμισοδιαπνοής στη κλιματική ταξινόμηση και ανέπτυξε μια εξίσωση για την εκτίμηση της δυνητικής εξατμισοδιαπνοής (Σημειώσεις Εργαστήριο Υδρολογίας και Ανάλυσης Υδατικών Συστημάτων, Λουκάς Α.). Εκφράζει τις απώλειες νερού πάνω από το έδαφος με βλάστηση, όταν υπάρχει επάρκεια νερού (Σημειώσεις Αειφορικής Διαχείρισης Υδατικών Πόρων, Ψιλοβίκος Α., 2005). Η μέση επιφανειακή εξατμισοδιαπνοή υπολογίστηκε και με τη μέθοδο Blaney-Criddle, της οποίας βασική παράμετρο αποτελεί η θερμοκρασία. Η μέθοδος των Blaney-Criddle είναι σχετικά εύκολη στη χρήση της με αρκετά ακριβή αποτελέσματα και αποτελεί μια απλούστερη εναλλακτική λύση για τον υπολογισμό της Εξατμισοδιαπνοής αναφοράς (ET_0). Ο Turc στηριζόμενος στο γεγονός ότι οι μέσες ετήσιες υδρολογικές απώλειες μεταβάλλονται σχετικά λίγο μεταξύ γειτονικών περιοχών και ο τύπος του είναι ο απλούστερος όλων γιατί για τον υπολογισμό του απαιτούνται μόνο δεδομένα βροχόπτωσης και θερμοκρασίας (Σημειώσεις Αειφορικής Διαχείρισης Υδατικών Πόρων, Ψιλοβίκος Α., 2005). Επιπλέον, η εξίσωση Hargreaves είναι μια πολύ απλή μέθοδος και απαιτεί ελάχιστα κλιματικά δεδομένα (Σημειώσεις Εργαστήριο Υδρολογίας και Ανάλυσης Υδατικών Συστημάτων, Λουκάς Α.). Πιο συγκεκριμένα, η μέθοδος Hargreaves έχει τον πιο απλό τρόπο υπολογισμού και οι τιμές συσχετίζονται με τη μέθοδο Penman-Monteith ενώ απαιτεί λιγότερες παραμέτρους εισόδου. Η μέθοδος αυτή όπως προτείνεται τελευταία και από την “ASCE Standardized Reference Evapotranspiration Task Committee. Appendix A”, συναρτήσεως της διαφοράς μέγιστης και ελάχιστης ημερήσιας θερμοκρασίας, της μέσης ημερήσιας θερμοκρασίας και της ακτινοβολίας στο εξωτερικό της ατμόσφαιρας R_a : Η μέθοδος χρησιμοποιείται σε περιοχές που δεν διατίθενται μετρήσεις ακτινοβολίας (Σημειώσεις Διαχείρισης Υδατικών Πόρων, Αλεξανδρής Σ.).

Επιπλέον, η εξίσωση Jensen-Haise υπολογίζει μικρότερες τιμές από τις πραγματικές τιμές της δυνητικής εξατμισοδιαπνοής κατά την διάρκεια της άνοιξης και μεγαλύτερες κατά την διάρκεια του καλοκαιριού (Σημειώσεις Εργαστήριο Υδρολογίας και Ανάλυσης Υδατικών Συστημάτων, Λουκάς Α.). Το προτεινόμενο μοντέλο των Priestley και Taylor, 1972 είναι μια εμπειρική προσέγγιση της πιο θεωρητικής εξίσωσης του Penman όπου απουσιάζει ο αεροδυναμικός όρος και γίνεται χρήση μόνο του ενεργειακού όρου πολλαπλασιαζόμενου με έναν συντελεστή $\alpha = 1.26$. Η μέθοδος αυτή θα μπορούσε να εφαρμοστεί σε περιοχές όπου γενικά επικρατούν υψηλές συνθήκες ατμοσφαιρικής υγρασίας (Σημειώσεις Διαχείρισης Υδατικών Πόρων, Αλεξανδρής Σ.).

Το μοντέλο Makkink σχεδιάστηκε το 1957 στην Ολλανδία ως τροποποίηση του μοντέλου Penman (1948) μετά τη σύγκριση του μοντέλου Penman με τα λυσιμετρικά δεδομένα. Επί του παρόντος, το μοντέλο Makkink είναι δημοφιλές στη Δυτική Ευρώπη (Allen 2003, Makkink 1957).

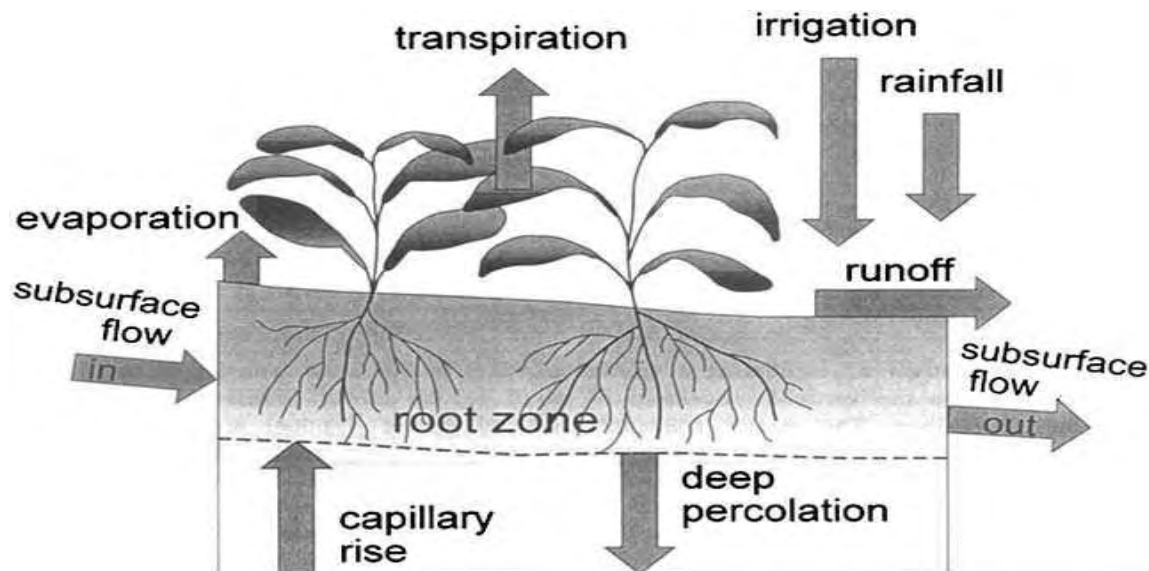
Όσον αφορά, την Εξατμισοδιαπνοή αναφοράς γρασιδιού συμβολίζεται ως ET_o και ορίζεται ως 'ο ρυθμός εξάτμισης από μία υποθετική καλλιέργεια αναφοράς με ύψος 0,12 m με σταθερή συνολική αντίσταση επιφάνειας 70 sec/m και albedo 0,23 δηλαδή με παρόμοιες συνθήκες ρυθμού εξατμισοδιαπνοής που προέρχεται από μία εκτεταμένη πράσινη επιφάνεια γρασιδιού ύψους 8-12 cm, αυξανόμενη, επαρκώς αρδευόμενη και πλήρη κάλυψη του εδάφους' Η Εξατμισοδιαπνοή Αναφοράς ή Βασική συμβολίζεται ως ET_r . Η Εξατμισοδιαπνοή αναφοράς (ET_o) ορίζεται ως 'ο ρυθμός εξάτμισης από μία υποθετική καλλιέργεια αναφοράς με ύψος 0,50 m με σταθερή συνολική αντίσταση επιφάνειας 45 sec/m και albedo 0,23 δηλαδή με συνθήκες παρόμοιες του ρυθμού εξατμισοδιαπνοής που προέρχεται από μια εκτεταμένη πράσινη επιφάνεια μηδικής ύψους 50 cm, αυξανόμενη, επαρκώς αρδευόμενη και με πλήρη κάλυψη του εδάφους' (Σημειώσεις Διαχείρισης Υδατικών Πόρων, Αλεξανδρής Σ.).

Η Εξατμισοδιαπνοή Καλλιέργειας (ET_c) εξαρτάται από το κλίμα και από τα χαρακτηριστικά της καλλιέργειας και σύμφωνα με τον παραπάνω ορισμό είναι ίση με ET_{max} (Σημειώσεις Εργαστήριο Υδρολογίας και Ανάλυσης Υδατικών Συστημάτων, Λουκάς Α.). Η Πραγματική Εξατμισοδιαπνοή συμβολίζεται ως ET_a και ορίζεται ως 'το ποσό του νερού που αφαιρείται πραγματικά από μια καλλιεργούμενη επιφάνεια λόγω των διεργασιών της εξάτμισης των εδαφών και διαπνοής της χλωρίδας κάτω από τις εκάστοτε συνθήκες διάθεσης εδαφικού νερού εδάφους' (Σημειώσεις Διαχείρισης Υδατικών Πόρων, Αλεξανδρής Σ.).

4.1 Εξατμισοδιαπνοή (ET)

Η Εξατμισοδιαπνοή (ET) είναι η απώλεια του νερού που επιτυγχάνεται με την εξάτμιση από την επιφάνεια του εδάφους και των φυτών (όταν το φύλλωμα είναι υγρό) με το συνδυασμό απώλειας νερού μέσω της διαπνοής. Εξαρτάται από τα χαρακτηριστικά των φυτών και εδάφους, τη διαθέσιμη ενέργεια και τις συνθήκες της ατμόσφαιρας. Χρησιμοποιείται για το σχεδιασμό συστημάτων άρδευσης, το προγραμματισμό άρδευσης, στραγγίσεις και για υδρολογικές μελέτες. Η εξατμισοδιαπνοή μπορεί να μετρηθεί άμεσα με: α) δεξαμενές β) λυσίμετρα και γ) με τη χρήση αγροτεμαχίων. Όσον αφορά, την έμμεση μέτρηση της επιτυγχάνεται με μεθόδους υδατικού

ισοζυγίου και με μεθόδους προσδιορισμού της δυνητικής εξατμισοδιαπνοής από μετεω-κλιματικά δεδομένα (Σημειώσεις Διαχείρισης Υδατικών Πόρων, Αλεξανδρής Σ.).



Εικόνα 4.1 Διάγραμμα Εξάτμισης & Διαπνοής (FAO, 2009)

Έμμεση εκτίμηση της Εξατμισοδιαπνοής

Μέθοδοι Υδατικού Ισοζυγίου

Όταν δεν υπάρχει άρδευση η εξατμισοδιαπνοή δίνεται από την εξίσωση

$$ET = P + \Delta SW \pm RO - D$$

Όπου,

P είναι η κατακρήμνιση

ΔSW η μεταβολή της περιεκτικότητας του εδάφους σε νερό

RO η επιφανειακή απορροή και

D βαθιά διήθηση

- Η μέθοδος αυτή έχει μειονεκτήματα τα οποία βασίζονται στη χαμηλού επιπέδου ακρίβεια των μετρήσεων και στη δυσκολία εκτίμησης του ET στη διάρκεια των περιόδων βροχόπτωσης. Δυστυχώς, η εξατμισοδιαπνοή από φυτοκαλυμμένες περιοχές και η εξάτμιση από ελεύθερες επιφάνειες νερού είναι ακόμη από τις λιγότερο κατανοητές συνιστώσες του υδρολογικού κύκλου και η εκτίμησή τους σε εκτεταμένες περιοχές παραμένει δύσκολη (Σημειώσεις Αειφορικής Διαχείρισης Υδατικών Πόρων, Ψιλοβίκος Α., 2005).

4.2 Δυνητική Εξατμισοδιαπνοή (ET_p)

Η έννοια της Δυνητικής Εξατμισοδιαπνοής εισήχθη για πρώτη φορά στα τέλη της δεκαετίας του '40 και στις αρχές της δεκαετίας του '50 από τον Penman και ορίζεται ως 'το ποσό του νερού που διαπνέεται και εξατμίζεται σε ένα δεδομένο χρόνο από μια χαμηλή πράσινη βλάστηση, η οποία καλύπτει εντελώς το έδαφος σε ομοιόμορφο ύψος από αναπτυσσόμενη χλωρίδα, σε συνθήκες απεριόριστου εδαφικού νερού'. Είναι απαραίτητο να τονιστεί ότι ο ρυθμός εξατμισοδιαπνοής δε συσχετίζεται με μια συγκεκριμένη καλλιέργεια. (Σημειώσεις Διαχείρισης Υδατικών Πόρων, Αλεξανδρής Σ.). Είναι γνωστό ότι η δυνητική εξατμισοδιαπνοή εξαρτάται κυρίως από τη θερμοκρασία, την ηλιακή ακτινοβολία και τη σχετική διάρκεια ημέρας και νύχτας και δευτερευόντως από την ταχύτητα του ανέμου και την σχετική υγρασία (Σημειώσεις Αειφορικής Διαχείρισης Υδατικών Πόρων, Ψιλοβίκος Α., 2005).



Εικόνα 4.2: Δυνητική Εξατμισοδιαπνοή-χαμηλή πράσινη βλάστηση

Μοντέλο Penman-Monteith

Εξίσωση Penman-Monteith (Allen et al.,1998)

$$ET_0 = \frac{0.408\Delta(R_n - G)}{\Delta + \gamma(1 + 0.34u)} + \frac{900\gamma}{[\Delta + \gamma(1 + 0.34u)]} \cdot \frac{uD}{(T + 273)}$$

Δηλαδή,

$$ET_o = \frac{0.408\Delta(R_n - G) + \gamma \frac{900}{T+273} u_2(e_s - e_a)}{\Delta + \gamma(1 + 0.34u_2)}$$

Δεδομένα που απαιτούνται για την εφαρμογή της FAO-56 Penman-Monteith (FAO56-PM) είναι:

Μέγιστη και ελάχιστη θερμοκρασία, Tmax και Tmin, αντίστοιχα;

•Rs=ηλιακή ακτινοβολία (MJ/m²/d);

•RHmax,RHmin =μέγιστη και ελάχιστη σχετική υγρασία

•u₂=ταχύτητα ανέμου σε 2m ύψος (m/s)

Αυτή η μέθοδος θεωρείται πρότυπη και η πιο ακριβής για τον υπολογισμό της Εξατμισοδιαπνοής αναφοράς (ET_o). Η μέθοδος FAO Penman-Monteith θεωρείται παγκόσμια για τον υπολογισμό του ET_o για περισσότερο από μία δεκαετία και περιλαμβάνει πολλές παραμέτρους σχετικά με τη διαδικασία της εξατμισοδιαπνοής. Έχει παρουσιάσει καλά αποτελέσματα όταν συγκρίνεται με δεδομένα από λυσίμετρα. Σε μερικές περιπτώσεις η χρήση της μεθόδου FAO PM είναι περιορισμένη λόγω έλλειψης εισόδου μεταβλητών. Σε αυτές τις περιπτώσεις όταν λείπουν δεδομένα, η επιλογή είναι να υπολογίσεις την Εξατμισοδιαπνοή αναφοράς (ET_o) από τη μέθοδο FAO-PM χρησιμοποιώντας κατά προσέγγιση μεταβλητές εισόδου, όπως προτείνεται από τον FAO Irrigation and Drainage Paper 56. Όταν η σχετική υγρασία RH και η U λείπουν, η μέθοδος FAO PM είναι μια καλή επιλογή για τον υπολογισμό της Εξατμισοδιαπνοής αναφοράς (ET_o). Απαιτεί δεδομένα θερμοκρασίας αέρα, ακτινοβολία, υγρασία αέρα και ταχύτητα ανέμου. Σε αντίθεση με τη θερμοκρασία αέρα οι άλλες μεταβλητές είναι λιγότερο διαθέσιμες, εμποδίζοντας την εφαρμογή της μεθόδου FAO-PM. Όταν λείπουν μια ή περισσότερες μεταβλητές τότε οι τιμές των μεταβλητών της

εξίσωσης FAO-PM είναι πιο κοντά σε σχέση με της FAO-56. Εμφανίζει πολύ καλύτερα τα αποτελέσματα το καλοκαίρι.

Μέθοδος Thornthwaite

Ο Thornthwaite (1948) περιέγραψε τη βιολογική και φυσική σημασία της εξατμισοδιαπνοής στη κλιματική ταξινόμηση και ανέπτυξε μια εξίσωση για την εκτίμηση της δυνητικής εξατμισοδιαπνοής (Σημειώσεις Εργαστήριο Υδρολογίας και Ανάλυσης Υδατικών Συστημάτων, Λουκάς Α.).

Σχέση για τη μηνιαία εξατμισοδιαπνοή με βάση τη μηνιαία θερμοκρασία:

$$E_p = 16 \left(\frac{10t_i}{J} \right)^\alpha \frac{\mu N}{360}$$

E_p , είναι η δυνητική εξατμισοδιαπνοή σε mm/μήνα

t_i , είναι η μέση μηνιαία θερμοκρασία σε °C

μ , ο αριθμός των ημερών

N , η μέση αστρονομική διάρκεια της ημέρας

J , ο ετήσιος δείκτης θερμοκρασίας και

α , μια εμπειρική παράμετρος που εξαρτάται από το δείκτη J

Ο δείκτης θερμοκρασίας J , δίνεται από τη σχέση

$$J = \sum_{i=1}^{12} j_i$$

Ο μηνιαίος δείκτης θερμοκρασίας j_i είναι συνάρτηση της μέσης μηνιαίας θερμοκρασίας κατά την εξίσωση:

$$j_i = 0.09 t_i^{3/2}$$

Εξίσωση για την εκτίμηση της δυνητικής εξατμισοδιαπνοής

$$ET\delta = 1,6 \cdot \left(10 \cdot \frac{T}{I} \right)^\alpha$$

Όπου,

ETδ , η μέση μηνιαία δυνητική εξατμισοδιαπνοή σε mm για ορισμένο μήνα

T, η μέση μηνιαία θερμοκρασία αέρος για τον υπόψιν μήνα (σε °C)

$$\alpha = 0,49239 + 1792 \cdot 10^{-5} - 771 \cdot 10^{-7} I^2 + 675 \cdot 10^{-9} \cdot I^3$$

I ο ετήσιος θερμικός δείκτης που δίνεται με τον τύπο : $I = \sum i$ για $i = 1, \dots, 12$

$$i = \left(\frac{T}{5} \right)^{1,514}$$

Οι υπολογιζόμενες τιμές ETδ για κάθε μήνα διορθώνονται με ένα συντελεστή (n) στον οποίο υπεισέρχονται τόσο ο αριθμός των ημερών κάθε μήνα όσο και των πραγματικών ωρών μεταξύ ανατολής και δύσης του ηλίου. Η διορθωμένη εξατμισοδιαπνοή ETδ προκύπτει από τον τύπο $ET_{\delta'} = n \cdot ET_{\delta}$.

Για τον υπολογισμό της θερμοκρασίας, ακολουθούνται όσα αναφέρθηκαν στον υπολογισμό των κατακρημνισμάτων, για το λόγο ότι και η θερμοκρασία όπως η βροχόπτωση είναι μέγεθος που καταγράφεται από τους μετεωρολογικούς σταθμούς. Σε περιπτώσεις που δεν υπάρχουν δεδομένα από θερμοκρασίες, μπορούν να χρησιμοποιηθούν χάρτες ισοθερμικών καμπυλών οι οποίοι δίνουν αρκετά ικανοποιητική ακρίβεια στα αποτελέσματά τους. Σε μια δοκιμή για την βελτίωση του υπολογισμού της Εξατμισοδιαπνοής αναφοράς (ET_o) προτάθηκε η χρήση της εξίσωσης Thornthwaite (1948) με τη χρήση αποτελεσματικής θερμοκρασίας αντί της μέσης θερμοκρασίας.

Μέθοδος Blaney-Criddle

Εμπειρική σχέση ανάμεσα στην εξατμισοδιαπνοή, τη μέση θερμοκρασία του αέρα και το μέσο ποσοστό ωρών ημέρας.

$$ET = kF = k \frac{(1.8T + 32)p}{3.94}$$

όπου

ET , είναι η μηνιαία δυνητική εξατμισοδιαπνοή σε mm,

K, είναι ένας εμπειρικός συντελεστής που αναφέρεται στη συγκεκριμένη καλλιέργεια (συντελεστής καλλιέργειας)

T , η μέση μηνιαία θερμοκρασία του αέρα σε °C

p , το ποσοστό ωρών ημέρας του μήνα

Εναλλακτικά το p δίνεται από τη σχέση:

$$p = 100 \frac{N \cdot \mu}{365 \cdot 12}$$

όπου,

N η μέση αστρονομική διάρκεια της ημέρας σε h και

μ ο αριθμός ημερών του συγκεκριμένου μήνα

Η μέση επιφανειακή εξατμισοδιαπνοή υπολογίστηκε με τη μέθοδο Blaney-Criddle, της οποίας βασική παράμετρο αποτελεί η θερμοκρασία, όπως φαίνεται από την παρακάτω σχέση:

$$ET_p = C_I^{BC} * P^{BC} (0,457T + 8,13) \text{ mm/μήνα}$$

όπου:

T μέση επιφανειακή θερμοκρασία,

P^{BC} ποσοστό ωρών ημέρας ανά μήνα.

Η τιμή του προκύπτει από πίνακα και είναι διαφορετική για κάθε μήνα. Από τον πίνακα επιλέγουμε να πάρουμε εκείνες τις τιμές που αντιστοιχούν σε περιοχές που βρίσκονται σε 40° βόρειο γεωγραφικό πλάτος,

C_1^{BC} η τιμή του λαμβάνεται ίση με 0,7

Η εξίσωση BC είναι απλή και παλιά μέθοδος για τον υπολογισμό της Εξατμισοδιαπνοής αναφοράς (ET_0) και αποτελεί μια απλούστερη εναλλακτική λύση για τον υπολογισμό της Εξατμισοδιαπνοής αναφοράς (ET_0) σε σύγκριση με την εξίσωση του PM. Σήμερα η μέθοδος αυτή δε χρησιμοποιείται λόγω των σημαντικών αποκλίσεων που παρουσιάζει από τη πραγματικότητα. Οι συντελεστές αναγκαίας κατανάλωσης δεν έχουν καμία αντιστοιχία με τους φυτικούς συντελεστές που χρησιμοποιούνται με την Εξατμισοδιαπνοή αναφοράς και δε πρέπει να συγχέονται με αυτούς.

Η μέθοδος των Blaney-Criddle επιλέχτηκε για το λόγο ότι είναι σχετικά εύκολη στη χρήση της με αρκετά ακριβή αποτελέσματα. Έχει χρησιμοποιηθεί πολύ, αρχικά στις δυτικές Η.Π.Α., αλλά στη συνέχεια είναι γεγονός πως είχε παγκόσμια αποδοχή και στηρίζεται στην T και όχι στην Rn άρα προσεκτικά σε: (Σημειώσεις Αειφορικής Διαχείρισης Υδατικών Πόρων, Ψιλοβίκος Α., 2005).

- ✓ παράκτιες περιοχές
- ✓ μεγάλο υψόμετρο
- ✓ έντονες διακυμάνσεις ηλιοφάνειας

Η μέθοδος των Blaney-Criddle λαμβάνει υπόψιν τη θερμοκρασία και τη σχετική διάρκεια ημέρας και νύχτας, αλλά δεν περιλαμβάνει όρο που να περιγράφει επακριβώς την ποσότητα της προσπίπτουσας ακτινοβολίας. Το γεγονός αυτό αποτελεί σαφώς μειονέκτημα με τις δύο προηγούμενες μεθόδους, Thornthwaite και Turc, η επιλογή της μεθόδου του Thornthwaite δεν ενδείκνυται για τους θερινούς και φθινοπωρινούς μήνες γιατί υποεκτιμά τις τιμές της πραγματικής εξατμισοδιαπνοής, ενώ η μέθοδος του Turc δίνει μικρότερες τιμές από τις πραγματικές κατά τη διάρκεια της άνοιξης και μεγαλύτερες κατά τη διάρκεια του καλοκαιριού (Σημειώσεις Αειφορικής Διαχείρισης Υδατικών Πόρων, Ψιλοβίκος Α., 2005).

Μέθοδος Hargreaves

$$ET_p = MF(18T_a + 32)CH$$

όπου,

ET_p είναι σε mm/μήνα,

MF είναι ένας μηνιαίος συντελεστής που εξαρτάται από το γεωγραφικό πλάτος και δίνεται από πίνακες,

T_a είναι η μέση μηνιαία θερμοκρασία (σε °C) και

CH είναι ένας διορθωτικός παράγοντας για τη σχετική υγρασία RH που χρησιμοποιείται μόνον όταν η μέση ημερήσια σχετική υγρασία ξεπερνά το 64%.

• Πολύ απλή μέθοδος και απαιτεί ελάχιστα κλιματικά δεδομένα

Η μέθοδος Hargreaves έχει τον πιο απλό τρόπο υπολογισμού και οι τιμές συσχετίζονται με τη μέθοδο Penman-Monteith. Όταν είναι διαθέσιμο μόνο το T τότε οι καλύτερες μέθοδοι για τον υπολογισμό του ET_o είναι οι Hargreaves και Thornthwaite και οι RMSEs είναι 0.79 και 0.83 mm/day (Tabari H., et al., 2011).

Hargreaves and Samani (1985)

$$HSET_o = 0.408 \cdot k_g \cdot R_s \cdot (T + 17.8)$$

Παρόλο που το R_s είναι σπάνια διαθέσιμο, είναι πιθανό να υπολογιστεί με ακρίβεια χρησιμοποιώντας την εξωγήινη ακτινοβολία R_a και την ελάχιστη και μέγιστη θερμοκρασία.

Η πιο κοινή εξίσωση HS είναι η:

• **Calibrated Hargreaves and Samani equation:**

$$ET_{CHS} = 0.0135 \cdot C_{HS} \cdot (T_{av} + 17.8) \cdot (T_{max} - T_{min})^{0.5} \\ \cdot R_a \cdot 0.408 \cdot d$$

$$ET_o = 0.408 \times 0.0030 \times (T_a + 20) \times (T_{\max} - T_{\min})^{0.4} \times R_a \quad (18)$$

$$ET_o = 0.408 \times 0.0025 \times (T_a + 16.8) \times (T_{\max} - T_{\min})^{0.5} \times R_a \quad (19)$$

$$ET_o = 0.408 \times 0.0013 \times (T_a + 17) \times (T_{\max} - T_{\min} - 0.0123P)^{0.76} \times R_a \quad (20)$$

Οι εξισώσεις Hargreaves και Samani θα έπρεπε να χρησιμοποιούνται τους καλοκαιρινούς μήνες. Εξάγεται το συμπέρασμα ότι οι εξισώσεις Hargreaves και Samani μοιάζουν με την Εξατμισοδιαπνοή αναφοράς (ET_o) περισσότερο από την εξίσωση Thornthwaite. Η συσχέτιση ανάμεσα στο E_{THS} και ET_o είναι καλύτερη από το E_{TT} και ET_o για τους περισσότερους σταθμούς και μήνες.

Μέθοδος Turc (θερμοκρασία –ακτινοβολία)

Ο Turc στηρίζεται στο γεγονός ότι οι μέσες ετήσιες υδρολογικές απώλειες μεταβάλλονται σχετικά λίγο μεταξύ γειτονικών περιοχών.

$$ET = \frac{P}{\sqrt{0,9 + \left(\frac{P}{L}\right)^2}}$$

ET, Η μέση ετήσια πραγματική εξατμισοδιαπνοή σε mm

P, το μέσο ετήσιο ύψος

$L=50+25T+0,05T^3$ συνάρτηση της μέσης ετήσιας θερμοκρασίας του αέρα, T(°C)

Ο τύπος του Turc είναι ο απλούστερος όλων γιατί για τον υπολογισμό του απαιτούνται μόνο δεδομένα βροχόπτωσης και θερμοκρασίας (Σημειώσεις Αειφορικής Διαχείρισης Υδατικών Πόρων, Ψιλοβίκος Α., 2005).

Μέθοδος Jensen–Haise (θερμοκρασία –ακτινοβολία)

Η μηνιαία δυνητική εξατμισοδιαπνοή σύμφωνα με τη μέθοδο Jensen-Haise (1963) υπολογίζεται από τη σχέση:

$$E_p = (0.025T + 0.008) H_{sh} / 59$$

όπου,

H_{sh} η προσπίπτουσα ακτινοβολία σε $\text{cal cm}^{-2}\text{day}^{-1}$,

T η μέση μηνιαία θερμοκρασία της λεκάνης σε $^{\circ}\text{C}$

Οι μέθοδοι που αναπτύχθηκαν από τον Turc (1954) και τους Jensen-Haise (1963) υπολογίζουν μικρότερες τιμές από τις πραγματικές τιμές της δυνητικής εξατμισοδιαπνοής κατά την διάρκεια της άνοιξης και μεγαλύτερες κατά την διάρκεια του καλοκαιριού. Η ανακολουθία αυτή οφείλεται στο γεγονός ότι οι δύο μέθοδοι υπερεκτιμούν την επίδραση της θερμοκρασίας σε σχέση με την επίδραση της ακτινοβολίας.

Jensen and Haise (1963):

$$ET_o = \frac{C_T(T_a - T_x) \times R_s}{\lambda}$$

Μέθοδος Priestley-Taylor (1972)

Το μοντέλο των Priestley και Taylor, 1972 είναι μια εμπειρική προσέγγιση της πιο θεωρητικής εξίσωσης του Penman όπου απουσιάζει ο αεροδυναμικός όρος και γίνεται χρήση μόνο του ενεργειακού όρου πολλαπλασιαζόμενου με έναν συντελεστή $\alpha = 1.26$.

Η μέθοδος θα μπορούσε να εφαρμοστεί σε περιοχές όπου γενικά επικρατούν υψηλές συνθήκες ατμοσφαιρικής υγρασίας. Υπάρχει γενική συμφωνία ότι μια ημερήσια μέση τιμή $\alpha = 1.26$ ισχύει στα υγρά κλίματα. Ο Morton, 1983 επισημαίνει ότι η τιμή 1,26, που υπολογίστηκε από τους Priestley και Taylor, αναπτύχθηκε χρησιμοποιώντας στοιχεία από υγρές καλλιεργούμενες επιφάνειες και από υδάτινες επιφάνειες. Ο Morton συνιστά ότι η τιμή αυξάνεται ελαφρά ($\alpha = 1.32$) για καλλιεργούμενες εκτάσεις, ως αποτέλεσμα της αύξησης στην τραχύτητα της επιφάνειας (Morton, 1983; Brutsaert and Stricker, 1979). Υψηλότερες τιμές του α , μέχρι και 1,74, έχουν προταθεί (ASCE, 1990) για

χρήση στις ημίξηρες ή ξηρές περιοχές. Ο συντελεστής α μπορεί επίσης να μεταβάλλεται εποχιακά (De Bruin and Keijman, 1979), ανάλογα με το κλίμα που διαμορφώνεται.

$$ET_o = \alpha \frac{\Delta}{\Delta + \gamma} (R_n - G)$$

ET_o εξατμισοδιαπνοή αναφοράς καλλιέργειας (mm day^{-1}),

γ ψυχομετρική σταθερά ($\text{kPa } ^\circ\text{C}^{-1}$),

α εμπειρικός συντελεστής

Δ κλίση καμπύλης πίεσης ατμών ($\text{kPa}^\circ\text{C}^{-1}$)

R_n καθαρή ακτινοβολία ($\text{MJ m}^{-2} \text{day}^{-1}$)

G πυκνότητα ροής θερμότητας εδάφους

Μέθοδος Makkink

Το μοντέλο Makkink σχεδιάστηκε το 1957 στην Ολλανδία ως τροποποίηση του μοντέλου Penman (1948) μετά τη σύγκριση του μοντέλου Penman με τα λυσιμετρικά δεδομένα. Σήμερα, το μοντέλο Makkink είναι δημοφιλές στη Δυτική Ευρώπη και έχει χρησιμοποιηθεί με επιτυχία στις ΗΠΑ (βλέπε Amatya et al., 1995). Ο Allen (2003) δίνει τη λειτουργική μορφή του μοντέλου Makkink.

$$ET_o = 0.61 \frac{\Delta}{\Delta + \gamma} \frac{R_s}{\lambda} - 0.12$$

Όπου:

ET_o εξατμισοδιαπνοή αναφοράς καλλιέργειας (mm day^{-1}),

R_s ηλιακή ακτινοβολία ($\text{MJ m}^{-2} \text{day}^{-1}$)

γ ψυχομετρική σταθερά ($\text{kPa } ^\circ\text{C}^{-1}$),

λ λανθάνουσα θερμότητα εξάτμισης, (MJ kg^{-1})

Δ κλίση καμπύλης πίεσης ατμών ($\text{kPa} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$)

4.3 Εξατμισοδιαπνοή Αναφοράς

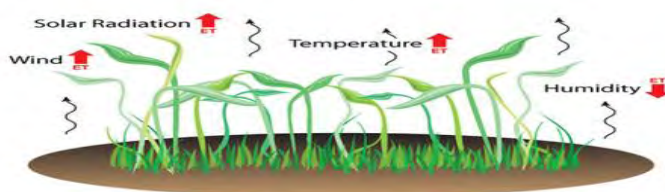
Οι κλιματικές συνθήκες ενσωματώνονται στην εκτίμηση της Εξατμισοδιαπνοής αναφοράς (ET_o). Η ET_o αντιπροσωπεύει ένα δείκτη των κλιματικών απαιτήσεων. Υπάρχουν δύο καλλιέργειες αναφοράς (Σημειώσεις Διαχείρισης Υδατικών Πόρων, Αλεξανδρής Σ.)

A) ET_o για μια χαμηλή καλλιέργεια με ύψος 0,12 m (ίδια με κουρεμένο γρασίδι)

B) ET_r για μια υψηλή καλλιέργεια με ύψος 0,50 m (μηδική)

Εξατμισοδιαπνοή αναφοράς γρασιδιού

Όπως προαναφέρθηκε παραπάνω η Εξατμισοδιαπνοή αναφοράς γρασιδιού συμβολίζεται ως ET_o και ορίζεται ως 'ο ρυθμός εξάτμισης από μία υποθετική καλλιέργεια αναφοράς με ύψος 0,12 m με σταθερή συνολική αντίσταση επιφάνειας 70 sec/m και albedo 0,23 δηλαδή με παρόμοιες συνθήκες ρυθμού εξατμισοδιαπνοής που προέρχεται από μία εκτεταμένη πράσινη επιφάνεια γρασιδιού ύψους 8-12 cm , αυξάνομενη, επαρκώς αρδευόμενη και πλήρη κάλυψη του εδάφους' (Σημειώσεις Διαχείρισης Υδατικών Πόρων, Αλεξανδρής Σ.).



Εικόνα 4.3a: Εξατμισοδιαπνοή αναφοράς γρασιδιού ([http22](http://22))

Εξατμισοδιαπνοή Αναφοράς ή Βασική

Η Εξατμισοδιαπνοή Αναφοράς ή Βασική συμβολίζεται ως ET_r . Η Εξατμισοδιαπνοή αναφοράς (ET_o) ορίζεται ως 'ο ρυθμός εξάτμισης από μία υποθετική καλλιέργεια αναφοράς με ύψος 0,50 m με σταθερή συνολική αντίσταση επιφάνειας 45 sec/m και albedo 0,23 δηλαδή με συνθήκες παρόμοιες του ρυθμού εξατμισοδιαπνοής που προέρχεται από μια εκτεταμένη πράσινη επιφάνεια μηδικής

ύψους 50 cm, αυξανόμενη, επαρκώς αρδευόμενη και με πλήρη κάλυψη του εδάφους' (Σημειώσεις Διαχείρισης Υδατικών Πόρων, Αλεξανδρής Σ.).



Εικόνα 4.3b:Εξατμισοδιαπνοή Αναφοράς ή Βασική στη Μηδική GEA (<http> 23)

Οι επιφάνειες των φύλλων της καλλιέργειας αναφοράς, τυπικά δεν είναι υγρές. Η Εξατμισοδιαπνοή αναφοράς, εκφράζεται είτε σαν ροή λανθάνουσας θερμότητας ανά μονάδα επιφάνειας λE_T , είτε σαν ισοδύναμο πάχος εξατμιζόμενου νερού ανά μονάδα χρόνου.

4.4 Εξατμισοδιαπνοή Καλλιέργειας (E_{Tc})

Εξαρτάται από το κλίμα και από τα χαρακτηριστικά της καλλιέργειας και σύμφωνα με τον παραπάνω ορισμό είναι ίση με E_{Tmax} (Σημειώσεις Εργαστήριο Υδρολογίας και Ανάλυσης Υδατικών Συστημάτων, Λουκάς Α.).

4.5 Πραγματική Εξατμισοδιαπνοή (E_{Ta})

Η Πραγματική Εξατμισοδιαπνοή συμβολίζεται ως E_{Ta} και ορίζεται ως 'το ποσό του νερού που αφαιρείται πραγματικά από μια καλλιεργούμενη επιφάνεια λόγω των διεργασιών της εξάτμισης των εδαφών και διαπνοής της χλωρίδας κάτω από τις εκάστοτε συνθήκες χωραφιού (πλήρης ή μερική διαθεσιμότητα εδαφικής υγρασίας, προσβολή ή όχι από ασθένειες, γονιμότητα του χωραφιού κ.α)' (Σημειώσεις Διαχείρισης Υδατικών Πόρων, Αλεξανδρής Σ.).



Εικόνα 4.5:Πραγματική Εξατμισοδιαπνοή

(Σημειώσεις: Αλεξανδρής Σ., Γεωπονικό Πανεπιστήμιο Αθηνών, Τμήμα Αξιοποίησης Φυσικών Πόρων και Γεωργικής Μηχανικής)

Το ανώτερο όριο είναι το ET_{max} με $E_t \leq E_{tc}$

5. Εφαρμογή

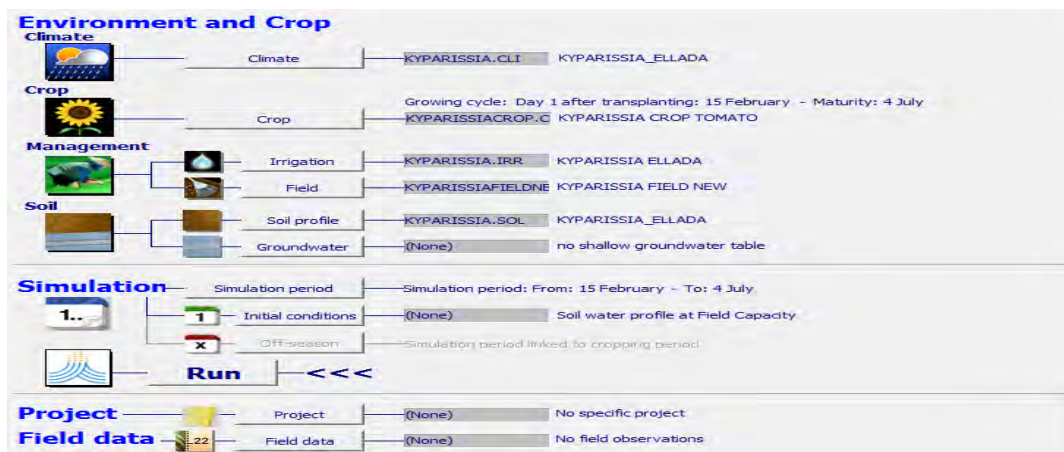
Στη παρούσα διατριβή χρησιμοποιήθηκαν τα προγράμματα ET_o calculator για τον υπολογισμό της εξατμισοδιαπνοής αναφοράς καθώς και το Aquacrop ως συνέχεια του ET_o calculator για την επιλογή της καλύτερης μεθόδου άρδευσης στη καλλιέργεια τομάτας (*Solanum lycopersicum*) με στόχο τη βέλτιστη παραγωγή. Η Εξατμισοδιαπνοή αναφοράς (ET_o) είναι κλιματική παράμετρος και μπορεί να υπολογιστεί από τα δεδομένα καιρού. Εκφράζει τη δύναμη εξάτμισης στην ατμόσφαιρα σε μια συγκεκριμένη τοποθεσία και χρονική περίοδο του χρόνου και όχι τα χαρακτηριστικά της καλλιέργειας και τους παράγοντες του. Ένας μεγάλος αριθμός εμπειρικών και ημι-εμπειρικών εξισώσεων έχουν αναπτυχθεί για την εκτίμηση της εξατμισοδιαπνοής από μετεωρολογικά δεδομένα. Η μέθοδος FAO-Penman-Monteith συνίσταται πλέον ως η πρότυπη μέθοδος για τον προσδιορισμό και τον υπολογισμό της Εξατμισοδιαπνοής αναφοράς (ET_o). Τα μετεωρολογικά δεδομένα που χρησιμοποιήθηκαν είναι ημερήσια δεδομένα από την 1 Ιανουαρίου 2013 έως 31 Δεκεμβρίου 2016. Υπολογίζοντας όμως τους μέσους όρους για κάθε μήνα και κάθε χρόνο, στο τέλος υπολογίστηκαν οι μέσοι και προέκυψαν δώδεκα τιμές οι οποίες και αντιστοιχούν σε κάθε μήνα. Αυτές οι τιμές εισήχθησαν στο λογισμικό για τον υπολογισμό της εξατμισοδιαπνοής αναφοράς η οποία συμπεριλαμβάνεται στο πρόγραμμα ET_o calculator με την έννοια της εξίσωσης FAO Penman-Monteith. Οι παράμετροι που χρησιμοποιήθηκαν για τον υπολογισμό της Εξατμισοδιαπνοής αναφοράς (ET_o) είναι η μέση θερμοκρασία αέρα (T_{mean}), η μέγιστη θερμοκρασία αέρα (T_{max}), η ελάχιστη θερμοκρασία αέρα (T_{min}) μετρημένες σε °C, η μέγιστη σχετική υγρασία (RH_{max}), η ελάχιστη σχετική υγρασία (RH_{min}) εκφρασμένες επί % και η μέση ταχύτητα ανέμου (u_2) σε m/s ενώ τιμές για τους συντελεστές a και b προκύπτουν από την εξίσωση του Angstrom. Η Εξατμισοδιαπνοή αναφοράς (ET_o) υπολογίζεται σε mm/monthly.

Πίνακας 5.1 :Εισαγωγή μηνιαίων κλιματικών δεδομένων για τους μήνες Ιανουάριο-Δεκέμβριο και υπολογισμός της Εξατμισοδιαπνοής αναφοράς (ET_o)

Month		January	February	March	April	May	June	July
Tmax	°C	16.0	16.9	18.4	21.3	24.8	28.0	30.7
Tmean	°C	12.1	12.9	14.0	16.4	19.8	23.2	26.1
Tmin	°C	7.9	8.9	9.5	11.3	14.8	18.3	21.1
RHmax	%	88.3	85.9	89.0	88.2	87.8	87.7	85.0
RHmin	%	55.8	53.2	53.1	50.2	51.0	51.8	50.5
u(2)	m/sec	5.51	6.61	5.75	4.41	4.35	3.46	3.14
ET _o	mm/day	2.3	3.0	3.4	4.3	5.2	5.6	6.0

Month		June	July	August	September	October	November	December
Tmax	°C	28.0	30.7	31.2	28.2	24.1	20.8	16.5
Tmean	°C	23.2	26.1	26.7	24.0	21.3	16.6	12.2
Tmin	°C	18.3	21.1	21.8	19.8	15.8	12.6	8.0
RHmax	%	87.7	85.0	83.8	85.2	88.9	88.8	86.9
RHmin	%	51.8	50.5	47.6	53.5	58.2	57.0	54.8
u(2)	m/sec	3.46	3.14	3.54	3.72	3.49	4.37	4.46
ET _o	mm/day	5.6	6.0	5.9	4.6	3.1	2.6	2.1

Τα αποτελέσματα του ET_o calculator χρησιμοποιούνται ως δεδομένα εισόδου για το πρόγραμμα Aquacrop. Ο τύπος καλλιέργειας που επιλέγεται είναι φυλλώδη λαχανικά και η μέθοδος φύτευσης είναι η μεταφύτευση. Η καλλιεργητική περίοδος ορίζεται από 15 Φεβρουαρίου έως 4 Ιουλίου για την ωρίμανση και συγκομιδή της καλλιέργειας με διάρκεια καλλιεργητικού κύκλου να ανέρχεται σε 140 ημέρες. Τελειώνοντας με το φάκελο καλλιέργειας δημιουργείται φακέλος άρδευσης με την ονομασία της περιοχής και μια περιγραφή γι' αυτόν το φάκελο επιλέγοντας τη μέθοδο άρδευσης είτε με Sprinkler irrigation είτε με Drip irrigation και στη συνέχεια τις ημέρες άρδευσης και το βάθος. Επιπλέον, δημιουργείται φάκελος Field management με την ονομασία της περιοχής και μια περιγραφή για αυτόν το φάκελο και στη συνέχεια καθορίζονται τα επιστρώματα και η ύπαρξη ή όχι αναχωμάτων. Η διαδικασία του προγράμματος συνεχίζεται με τη δημιουργία φακέλου εδάφους με την ονομασία της περιοχής και μια περιγραφή γι' αυτόν το φάκελο. Στο φάκελο αυτό προσδιορίζεται ο τύπος του εδάφους και συγκεκριμένα στην επιλεγείσα περιοχή μελέτης επιλέγεται η κατηγορία αμμοπηλώδη εδάφη καθώς και η εξάτμιση του εδάφους. Επίσης, είναι σημαντικό στο πρόγραμμα αυτό να δημιουργηθεί ο φάκελος προσομοίωσης όπου καθορίζεται όπως προαναφέρθηκε η περίοδος προσομοίωσης από 15 Φεβρουαρίου έως 4 Ιουλίου με διάρκεια 140 ημέρες (FAO 2012).



Εικόνα 5.1a:Εικόνα Aquacrop με τους ενημερωμένους φακέλους του

Επιπλέον, στο πρόγραμμα αυτό δημιουργείται project το οποίο περιέχει το φάκελο του κλίματος και ενημερώνει για τις παραμέτρους που είναι απαραίτητες. Με την εισαγωγή δεδομένων εμφανίζει τα διαγράμματα βροχόπτωσης, ET_0 , θερμοκρασίας και ατμοσφαιρικής συγκέντρωσης CO_2 . Στη συνέχεια, στο φάκελο της καλλιέργειας επιλέγεται το αρχείο με τη καλλιέργεια που θα χρησιμοποιηθεί ύστερα από τη δημιουργία του και προσδιορίζεται η έναρξη της καλλιεργητικής περιόδου. Όσον αφορά, το φάκελο άρδευσης επιλέγεται το αρχείο με το τύπο άρδευσης που μας ενδιαφέρει δηλαδή με Sprinkler ή Drip και για το φάκελο field επιλέγεται αν θα χρησιμοποιηθούν αναχώματα ή όχι (bunds). Στο αρχείο εδαφικού προφίλ επιλέγεται ο τύπος εδάφους της Κυπαρισσίας ο οποίος είναι αμμοπηλώδη εδάφη, ενημερώνεται η περίοδος προσομοίωσης και το ημερολόγιο του καλλιεργητικού κύκλου. Αφού ενημερωθούν όλοι οι φακέλοι ξεκινάει η προσομοίωση με τα αποτελέσματα τους να παρουσιάζονται παρακάτω.

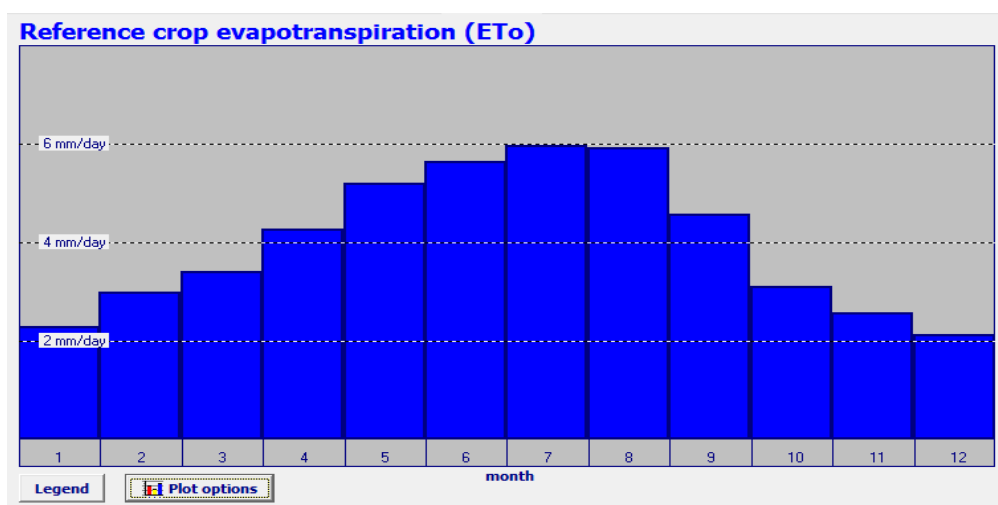
Τέλος, να σημειωθεί ότι στη παρούσα διατριβή για τη περιοχή μελέτης χρησιμοποιήθηκαν τέσσερις τύποι άρδευσης (4 σενάρια) και έγινε σύγκριση των αποτελεσμάτων με μέθοδο άρδευσης Sprinkler και με μέθοδο άρδευσης Drip. Οι συγκρίσεις έγιναν ανάμεσα στη μέθοδο άρδευσης Sprinkler χωρίς αναχώματα και στη μέθοδο άρδευσης Drip χωρίς αναχώματα. Επιπλέον, έγινε σύγκριση με τη μέθοδο άρδευσης Sprinkler με αναχώματα και χωρίς αναχώματα και με τη μέθοδο άρδευσης Drip με αναχώματα και χωρίς αναχώματα.



Εικόνα 5.1b:Χάρτης απεικόνισης της Κυπαρισσίας Μεσσηνίας (<http24>)

6. Αποτελέσματα-Συζήτηση

Τα αποτελέσματα του ET₀ Calculator που αφορούν την εξατμισοδιαπνοή αναφοράς που χρησιμοποιήθηκε ως δεδομένο εισόδου του προγράμματος Aquacrop φαίνονται στο Σχήμα 6.1. Αναφορικά με τις κλιματικές συνθήκες της Περιοχής Μελέτης το ET₀ εμφανίζει τις μεγαλύτερες τιμές του κατά τους καλοκαιρινούς μήνες και συγκεκριμένα τον μήνα Ιούλιο (6 mm/day) όπου σημειώθηκαν οι υψηλότερες θερμοκρασίες.



Σχήμα 6.1: Αποτελέσματα ET₀ Calculator

Όπως προαναφέρθηκε, το Aquacrop στη παρούσα διατριβή χρησιμοποιήθηκε για να επιλεγεί η καταλληλότερη μέθοδος ποτίσματος που θα επιφέρει τα καλύτερα αποτελέσματα στην τελική παραγωγικότητα στη καλλιέργεια τομάτας στη περιοχή Κυπαρισσίας Μεσσηνίας.

Η πρώτη μέθοδος άρδευσης που εξετάστηκε είναι η Sprinkler, η οποία διανέμει νερό ψεκάζοντας το στο πεδίο όπως δηλαδή γίνεται η άρδευση σε κάποιου είδους καλλιέργειες. Το νερό διανέμεται μέσα από ένα σύστημα σωλήνων συνήθως με άντλία υπό πίεση. Η πίεση ωθεί το νερό μέσω ψεκαστήρων στους αγωγούς και έτσι σχηματίζει ψεκασμό. Οι κεφαλές ψεκασμού κατανέμουν το νερό σε ολόκληρη την επιφάνεια του εδάφους. Η μέθοδος αυτή είναι η καλύτερη μέθοδος για να χρησιμοποιηθεί σε εδάφη με υψηλά ποσοστά πρόσληψης, σε πεδία με απότομες κλίσεις ή ακανόνιστη τοπογραφία και σε εδάφη που είναι υπερβολικά ρηχά σε επίπεδο. Τα sprinklers παρέχουν αποτελεσματική κάλυψη τόσο σε μικρές όσο και σε μεγάλες περιοχές/κτμήματα και είναι κατάλληλα για τις περισσότερες καλλιέργειες. Θεωρείται απομίμηση της φυσικής βροχόπτωσης από

τον άνθρωπο. Τα συστήματα αυτά έχουν ταξινομηθεί γενικά ως φορητά, ημιτελή ή μόνιμα. Η ταξινόμηση εξαρτάται από το αν ο πλευρικός αγωγός (συμπεριλαμβανομένων των καταγωνιστήρων), ο κύριος αγωγός και η εγκατάσταση άντλησης είναι κινητά ή σταθερά (Pair C.H.,1970).

Ένα σύστημα άρδευσης sprinkler αποτελείται από:

- A) Μονάδα αντλίας που λαμβάνει νερό από την πηγή και παρέχει πίεση για παράδοση στο σύστημα σωλήνων
- B) Κύριοι σωλήνες και δευτερεύοντες σωλήνες που παρέχουν νερό από την αντλία στα πλευρικά τοιχώματα
- Γ) Οι πλευρές μεταφέρουν νερό από τους σωλήνες στα sprinklers
- Δ) Εκτοξευτήρες, συσκευές που μετατρέπουν το πίδακα νερού σε σταγονίδια

Ο σχεδιασμός αυτής της μεθόδου γίνεται αποκλειστικά από τους μηχανικούς οι οποίοι για να σχεδιάσουν ένα καλό οικονομικό σύστημα επικεντρώνονται κυρίως στην ισορροπία ανάμεσα στο κόστος των σωλήνων και το κόστος της απαιτούμενης ενέργειας. Όσο πιο μεγάλος ο σωλήνας τόσο πιο ακριβό το σύστημα. Οι εκτοξευτήρες αυτοί μπορούν να μετακινηθούν σε διαφορετικές περιοχές του πεδίου είτε με το χέρι είτε με μηχανήματα. Η τεχνολογία άρδευσης με τους εκτοξευτήρες (sprinklers) μπορεί να υποστηρίξει τους αγρότες να προσαρμοστούν στη κλιματική αλλαγή κάνοντας ακόμα πιο αποτελεσματική χρήση του νερού τους. Κατά τη διάρκεια της νύκτας, μπορούν να μειώσουν το στρες στις καλλιέργειες προκαλούμενο από την απότομη μείωση της θερμοκρασίας (<http25>).

Τα κύρια μειονεκτήματα αυτής της μεθόδου αναφέρονται στις κλιματικές συνθήκες, στο νερό και στο κόστος. Ακόμη και μέτριοι άνεμοι μπορούν να μειώσουν σημαντικά την αποτελεσματικότητα των συστημάτων καταγωνιστήρων αλλάζοντας το μοτίβο διανομής των σταγονιδίων νερού. Αν και η άρδευση με sprinklers μπορεί να βοηθήσει τους αγρότες να χρησιμοποιούν πιο αποτελεσματικά τους υδάτινους πόρους, η τεχνολογία αυτή βασίζεται σε καθαρή πηγή νερού και συνεπώς ενδέχεται να μην είναι κατάλληλη για περιοχές όπου η βροχόπτωση καθίσταται λιγότερο προβλέψιμη. Τα sprinklers είναι κατάλληλα για όλους τους τύπους των εδαφών εκτός από τα βαριά πηλώδη εδάφη. Τέλος, ο μηχανισμός αυτός έχει υψηλές απαιτήσεις σε ενέργεια και το κόστος μεταβάλλεται ανάλογα με τη περιοχή (Pair C.H.,1970).

Από την άλλη πλευρά, η άλλη με μεγάλη επιτυχία και εξεζητημένη μέθοδος που χρησιμοποιείται στις καλλιέργειες είναι η μέθοδος στάγδην άρδευση (Drip irrigation). Στη μέθοδο αυτή το νερό εφαρμόζεται σε κάθε φυτό χωριστά σε μικρές, συνεχείς και ακριβείς ποσότητες μέσω σταγονιδίων. Είναι η πιο προηγμένη μέθοδος άρδευσης με την υψηλότερη απόδοση εφαρμογών. Το νερό διανέμεται συνεχώς σε σταγόνες στο ίδιο σημείο και μεταφέρεται μέσα στο έδαφος όπου και βρέχει τη ριζική ζώνη. Ένα ολοκληρωμένο σύστημα άρδευσης στάγδην αποτελείται από τον εγκέφαλο όπου γίνεται ο έλεγχος, από τους κεντρικούς αγωγούς, από τα στόμια υδροληψίας και από τις πλευρικές γραμμές με τα σταγονόμετρα (FAO 2012).

Όσον αφορά, το πρόγραμμα άρδευσης με στάγδην, η ριζική ζώνη διαβρέχεται μόνο εν μέρει και η διαθεσιμότητα της υγρασίας περιορίζεται. Ωστόσο, προκειμένου να επιτευχθούν υψηλότερες αποδόσεις, η συνήθης πρακτική είναι να ποτίζονται καθημερινά οι καλλιέργειες σε μεταγενέστερα στάδια. Κάτω από στάγδην άρδευση, τα περισσότερα λαχανικά αναπτύσσουν το μεγαλύτερο μέρος των ριζών τους στο πρώτο βάθος των 30 cm του προφίλ του εδάφους κάτω από το σημείο εκπομπής. (FAO, 2012).

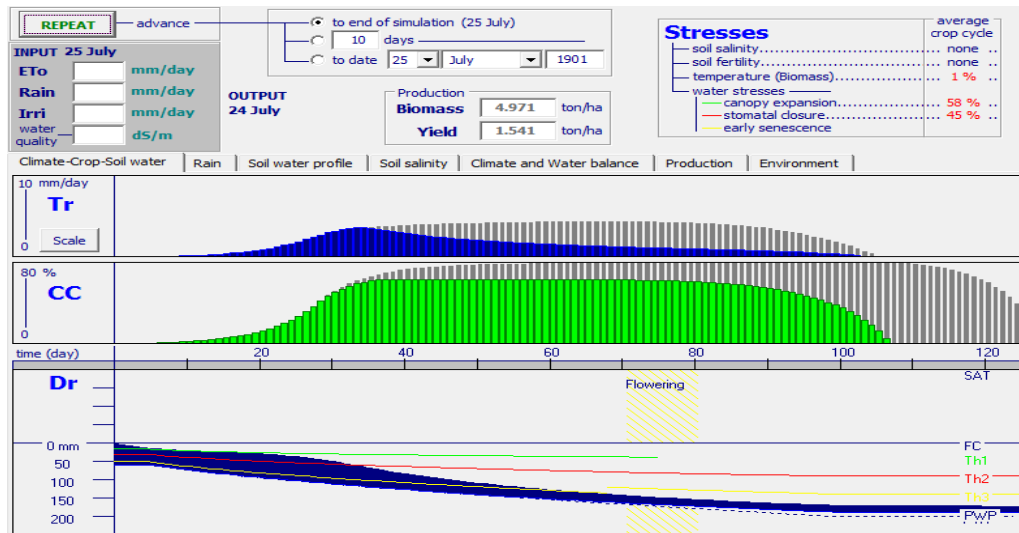
Τα πλεονεκτήματα αυτής της μεθόδου είναι:

- α) Η εξοικονόμηση νερού, αποθηκεύονται μεγάλες ποσότητες νερού άρδευσης και η αρδευόμενη περιοχή μπορεί να επεκταθεί με την ίδια παροχή νερού
- β) Αξιοποίηση των υδάτινων πόρων αλατότητας. Με στάγδην άρδευση, χαμηλές τάσεις υγρασίας του εδάφους στη ζώνη της ρίζας μπορούν να διατηρηθούν συνεχώς με συχνές εφαρμογές
- γ) Χρήση σε περιθωριακά πεδία και
- δ) Χαμηλές εργασιακές απαιτήσεις λειτουργίας, μειωμένη καλλιέργεια και έλεγχος ζιζανίων

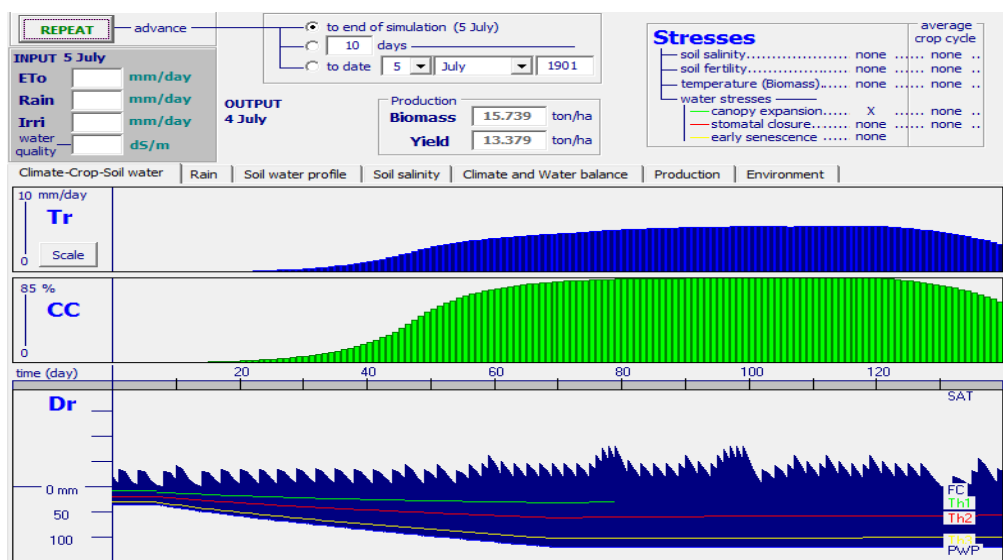
Αντίθετα, τα μειονεκτήματα χρήσης αυτής της μεθόδου είναι α) το υψηλό αρχικό κόστος αγοράς β) μπλοκαρίσματα στην παροχή νερού στις καλλιέργειες (FAO, 2012).

Πέρα από αυτά, σε όλη τη διάρκεια της εκτέλεσης προσομοίωσης παρακολουθούνται οι επιδράσεις του νερού, της θερμοκρασίας, το στρες της γονιμότητας και το στρες της αλατότητας στην ανάπτυξη των καλλιεργειών και τη παραγωγή. Επίσης, εμφανίζεται η προσομοιωμένη ποσότητα βιομάζας που παράγεται και θα μπορούσε να παραχθεί σε έλλειψη νερού, γονιμότητα του εδάφους και υψηλή αλατότητα.

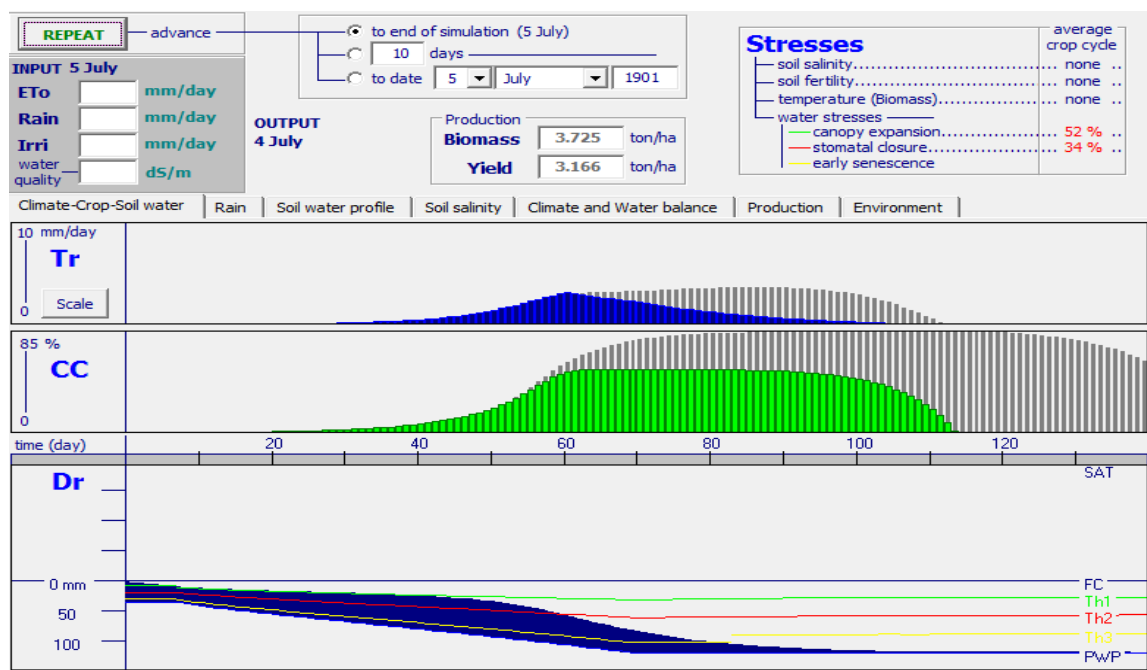
Στις παρακάτω εικόνες παρουσιάζονται τα αποτελέσματα ύστερα από τη χρησιμοποίηση του μοντέλου FAO Aquacrop και γίνονται συγκρίσεις στις μεθόδους άρδευσης που επιλέχθηκαν τόσο με αναχώματα όσο και χωρίς αναχώματα (Soil bunds).



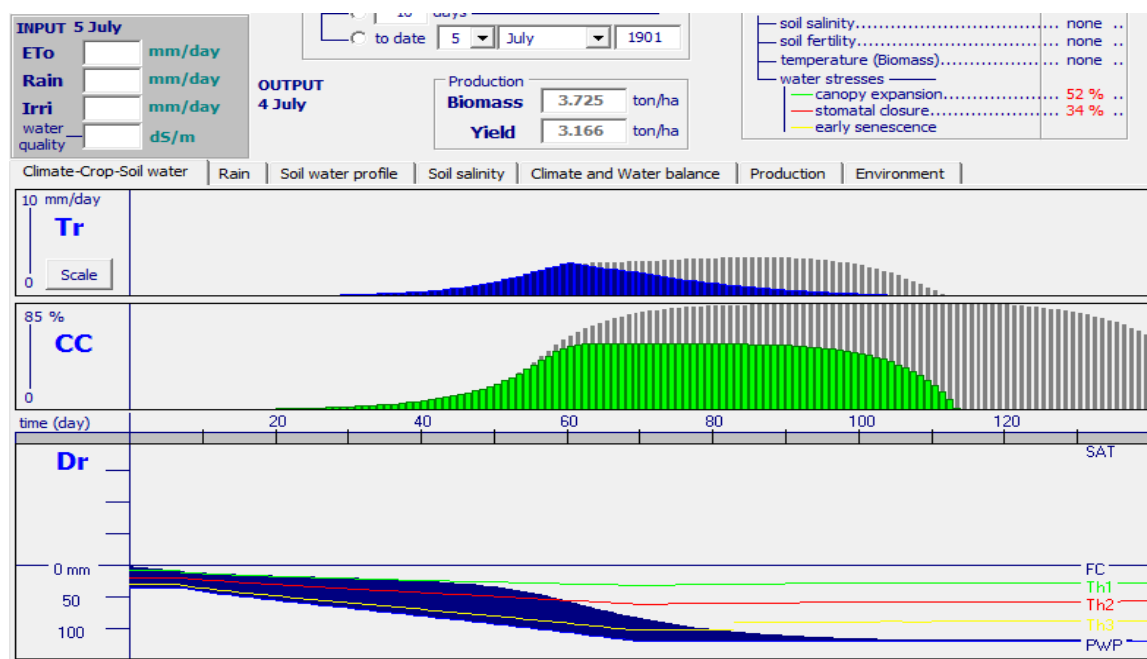
Εικόνα 6.1:Απεικόνιση αποτελέσματος του μοντέλου Aquacrop με μέθοδο άρδευσης Sprinkler χωρίς αναχώματα εδάφους (Soil bunds)



Εικόνα 6.2:Απεικόνιση του αποτελέσματος του μοντέλου Aquacrop με μέθοδο άρδευσης Drip χωρίς αναχώματα του εδάφους (Soil bunds)



Εικόνα 6.3:Απεικόνιση αποτελέσματος του μοντέλου Aquacrop με μέθοδο άρδευσης Sprinkler με αναχώματα του εδάφους (Soil bunds)



Εικόνα 6.4:Απεικόνιση αποτελέσματος του μοντέλου Aquacrop με μέθοδο άρδευσης Drip με αναχώματα του εδάφους (Soil bunds)

Με βάση τα αποτελέσματα εξάγεται το συμπέρασμα για την καταλληλότερη μέθοδο άρδευσης που προτείνεται να χρησιμοποιηθεί για την καλλιέργεια της τομάτας στη περιοχή μελέτης μας. Συγκρίνοντας τις εικόνες με τις μεθόδους άρδευσης Sprinkler και Drip χωρίς όμως αναχώματα εδάφους παρατηρείται ως πιο κατάλληλη μέθοδος η Drip χωρίς αναχώματα διότι η παραγωγή είναι σχεδόν δεκατρείς φορές υψηλότερη με αυτή τη μέθοδο και η βιομάζα περίπου τέσσερις φορές μεγαλύτερη από αυτή της μεθόδου Sprinkler. Συγκεκριμένα, η παραγωγή με τη μέθοδο Sprinkler είναι 1.541 ton/ha και η βιομάζα 4.971 ton/ha ενώ η παραγωγή με τη μέθοδο άρδευσης Drip 13.379 ton/ha και η βιομάζα 15.739 ton/ha. Επίσης, στις δύο αυτές μεθόδους γίνεται αντιληπτή η διαφορά στην φυλλική επιφάνεια με τη μέθοδο Drip να κυμαίνεται στο 85% ενώ με τη μέθοδο Sprinkler να κυμαίνεται στο 80% δηλαδή ακόμη και στη φυλλική επιφάνεια η αρδευτική μέθοδος Drip παρουσιάζει καλύτερα αποτελέσματα.

Όσον αφορά, τη σύγκριση ανάμεσα στην μέθοδο άρδευσης Sprinkler χωρίς αναχώματα εδάφους και Sprinkler με αναχώματα εδάφους φαίνεται να παρουσιάζει καλύτερα αποτελέσματα η δεύτερη περίπτωση στη παραγωγή αλλά καλύτερα αποτελέσματα εμφανίζει η πρώτη περίπτωση. Αυτό φαίνεται διότι η βιομάζα στη πρώτη περίπτωση είναι 4.971 ton/ha και η παραγωγή 1.541 ton/ha ενώ στη δεύτερη περίπτωση η βιομάζα είναι 3.725 ton/ha και η παραγωγή να κυμαίνεται σε 3.166 ton/ha. Επιπλέον, μια διαφορά που εντοπίζεται αφορά τη φυλλική επιφάνεια με μεγαλύτερη τιμή σε ποσοστό 85% να παρουσιάζει στη μέθοδο Sprinkler με αναχώματα εν αντιθέσει με την ανάλογη μέθοδο χωρίς όμως αναχώματα να είναι 80%.

Η τρίτη σύγκριση που γίνεται αφορά τη μέθοδο άρδευσης Drip χωρίς αναχώματα αλλά και με αναχώματα. Εξάγεται έτσι το συμπέρασμα πως η παρουσία ή όχι αναχωμάτων στην Στάγδην άρδευση επιφέρει μεταβολές στην παραγωγικότητα. Πιο συγκεκριμένα, στη πρώτη περίπτωση οι τιμές τους για τη βιομάζα είναι 15.739 ton/ha, για την παραγωγή 13.379 ton/ha και για τη φυλλική επιφάνεια να είναι σε ποσοστό 85% ενώ για τη δεύτερη περίπτωση η βιομάζα είναι 3.725 ton/ha και η παραγωγή 3.166 ton/ha. Αξίζει να τονιστεί πως η χρήση αναχωμάτων στη μέθοδο των εκτοξευτήρων κρίνεται αρκετά σημαντική, ενώ η παρουσία ή όχι αναχωμάτων στην Στάγδην άρδευση επιφέρει μεταβολές στη παραγωγικότητα.

Σύμφωνα, με έρευνα των Linker R., et al., 2016, το Aquacrop έχει παραμετροποιηθεί για πάνω από 15 καλλιέργειες σε διαφορετικές τοποθεσίες. Πρόκειται για ένα αποτελεσματικό εργαλείο το οποίο μπορεί να προβλέψει με λογική ακρίβεια τη συνολική βιομάζα και τη τελική απόδοση σε

ποικίλες αρδευτικές στρατηγικές από <καμία υδατική καταπόνηση> σε <ήπια υδατική καταπόνηση> και δείχνει τη δυνατότητα προσαρμογής ή και τροποποίησης.

Η παραγωγικότητα καλλιέργειας προέρχεται από κλιματικές μεταβλητές. Μερικές καλλιέργειες όπως οι τομάτες θα αντιμετωπίσουν σε μεγάλο βαθμό την προβλεπόμενη κλιματική αλλαγή για τον τρέχοντα αιώνα λόγω του καλοκαιρινού κύκλου ανάπτυξής τους. Μεσογειακές καλλιέργειες όπως η τομάτα (*Solanum lycopersicum*) θα αντιμετωπίσει κλιματική αλλαγή εξαιτίας της καλλιέργειας της, την περίοδο άνοιξη-καλοκαίρι η οποία χαρακτηρίζεται από υψηλές θερμοκρασίες και ξηρασία και μπορεί συχνά να εκτεθεί σε θερμικό στρες ιδιαίτερα κατά τη διάρκεια φάσεων που έχουν το μεγαλύτερο αντίκτυπο στη τελική απόδοση. Πράγματι, στη τομάτα η θερμική καταπόνηση σε συνδυασμό με την ξηρασία κατά τη διάρκεια της ανθοφορίας θα μπορούσε να προκαλέσει στειρότητα με απώλειες στην απόδοση (Garofalo, P., & Rinaldi, M. 2014).

7. Συμπεράσματα

Στην παρούσα διατριβή, για τον υπολογισμό της Εξατμισοδιαπνοής αναφοράς (ET_o) έγινε χρήση του προγράμματος ET_o calculator για την αξιολόγηση της από μετεωρολογικά δεδομένα σύμφωνα με την εξίσωση του Penman-Monteith. Αυτή η μέθοδος έχει επιλεγεί από τον FAO σαν πρότυπη επειδή προσεγγίζει προσεκτικά την εξατμισοδιαπνοή αναφοράς στη τοποθεσία που αξιολογείται. Βασίζεται σε φυσικές και ενσωματώνεται τόσο σε φυσιολογικές όσο και σε αεροδυναμικές παραμέτρους. Η έννοια της εξατμισοδιαπνοής εισάχθηκε για να μελετηθεί η απαιτούμενη εξάτμιση στην ατμόσφαιρα ανεξάρτητα από το τύπο καλλιέργειας που χρησιμοποιείται, την ανάπτυξη της καλλιέργειας και τις διαχειριστικές πρακτικές.

Τα αποτελέσματα της χρησιμοποιήθηκαν ως δεδομένα εισόδου για τη χρησιμοποίηση του μοντέλου FAO Aquacrop προκειμένου να μελετηθεί ο καλύτερος τρόπος άρδευσης ώστε να προκύψει μια ακριβής προσομοίωση της απόκρισης της καλλιέργειας στο σύστημα φυτών-εδάφους.

Το μοντέλο Aquacrop που προσφέρεται από τον FAO παρέχει έναν καλό συνδυασμό ανάμεσα στην ακρίβεια και την απλότητα. Παρατηρήθηκε ότι το μοντέλο είναι σχετικά εύκολο στη χρήση και λειτουργεί σωστά ακόμα κι αν περιορισμένα δεδομένα εισόδου είναι διαθέσιμα. Είναι εξαιρετικά αξιόπιστο για τις προσομοιώσεις της βιομάζας, της απόδοσης και των αναγκών σε νερό (FAO 2009).

Όπως και σε άλλα μοντέλα, το AquaCrop διαρθρώνει τη συνεχή εδαφική-καλλιεργητική ατμόσφαιρα συμπεριλαμβάνοντας το έδαφος, με το υδατικό ισοζύγιο του. (i) το φυτό, με τις διαδικασίες ανάπτυξης, και απόδοσης και (ii) την ατμόσφαιρα, με τη θερμική της κατάσταση, τη βροχόπτωση, την απαιτούμενη εξάτμιση και τη συγκέντρωση διοξειδίου του άνθρακα.

Επιπλέον, οι στρατηγικές που χρησιμοποιήθηκαν στη παρούσα εργασία για την επιλογή της καλύτερης μεθόδου άρδευσης στη καλλιέργεια της τομάτας (*Solanum lycopersicum*) είναι με στάγδην άρδευση (Drip irrigation) και με εκτοξευτήρες (Sprinkler irrigation) με συνδυασμό ή όχι αναχωμάτων εδάφους (soil bunds). Η κυριότερη σύγκριση και με τη μεγάλη διαφορά που εντοπίστηκε αφορά τη στάγδην άρδευση και άρδευση με εκτοξευτήρες χωρίς αναχώματα εδάφους με εμφανώς καλύτερα αποτελέσματα να διακρίνονται στην Drip άρδευση τόσο στη παραγωγή της τομάτας (*Solanum lycopersicum*) όσο και στη βιομάζα της.

Τέλος, η σύγκριση μεθόδων εξατμισοδιαπνοής στην παρούσα εργασία έδωσε τον παρακάτω συγκετρωτικό πίνακα (Πίνακας 7.1).

Πίνακας 7.1: Συγκεντρωτικός πίνακας μεθόδων υπολογισμού της εξατμισοδιαπνοής

Μέθοδος	ET_o	ET_r	H	D	M	n	T	RH	U(x)	Rs	Rn	G
FAO 56 PM	✓	✓	NAI	NAI	NAI		✓	✓	✓		✓	✓
Penman 1963	✓		NAI	NAI	NAI		✓	✓	✓		✓	✓
FAO 24 Blaney - Criddle	✓			NAI	NAI	✓	✓	✓	✓	✓		
Hargreaves 1974	✓			NAI	NAI		✓			✓		
Hargreaves 1985	✓			NAI	NAI		✓					
Turc	✓			NAI	NAI		✓	✓			✓	
Priestley-Taylor	✓			NAI	NAI		✓				✓	
Jensen – Haise 1963-1966		✓		NAI	NAI		✓			✓		
Makkink	✓			NAI	NAI		✓			✓		

Βιβλιογραφία

- Allen, R., L.S. Pereira, D. Raes, and M. Smith., 1998. Crop evapotranspiration – Guidelines for computing crop water requirements. FAO Irrigation and Drainage Paper N° 56. Rome, Italy.
- Amatya, D. M., Skaggs, R. W., & Gregory, J. D. (1995). Comparison of methods for estimating REF-ET. *Journal of irrigation and drainage engineering*, 121(6), 427-435.
- Cai, J., Liu, Y., Lei, T., & Pereira, L. S. (2007). Estimating reference evapotranspiration with the FAO Penman–Monteith equation using daily weather forecast messages. *Agricultural and Forest Meteorology*, 145(1), 22-35.
- FAO. (2012). ETo Calculator. Land and Water Digital Media Series, N° 36. FAO, Rome, Italy.
- Garofalo, P., & Rinaldi, M. (2014, June). Impact of climate change and adaptation strategies on irrigation and tomato productivity: a long-term case study in mediterranean environment. In *XIII International Symposium on Processing Tomato 1081* (pp. 89-96).
- Hargreaves, G. H., & Samani, Z. A. (1985). Reference crop evapotranspiration from temperature. *Appl. Eng. Agric*, 1(2), 96-99.
- Hargreaves, G.H., 1994. Defining and using reference evapotranspiration. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*. Vol 120 (6): 1132 - 1139.
- Jacovides, C. P., and Kontoyiannis, H. (1995). Statistical procedures for the evaluation of evapotranspiration computing models. *Agricultural Water Management* 27, 365–371.
- Jensen, D. T., Hargreaves, G. H., Temesgen, B., & Allen, R. G. (1997). Computation of ETo under nonideal conditions. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 123(5), 394-400.
- Krause, P., Boyle, D. P., and Bäse, F. (2005). Advances in Geosciences Comparison of different efficiency criteria for hydrological model assessment. *Advances In Geosciences*, 89–97.
- Legates, D. R., and McCabe, G. J. (1999). Evaluating the use of “goodness-of-fit” measures in hydrologic and hydroclimatic model validation. *Water Resources Research* 35, 233–241.
- Linker, R., Ioslovich, I., Sylaios, G., Plauborg, F., & Battilani, A. (2016). Optimal model-based deficit irrigation scheduling using AquaCrop: A simulation study with cotton, potato and tomato. *Agricultural Water Management*, 163, 236-243.

Loague, K., and Green, R. E. (1991). Statistical and graphical methods for evaluating solute transport models: Overview and application. *Journal of Contaminant Hydrology* 7, 51–73.

Mohawesh, O. E. (2011). Evaluation of evapotranspiration models for estimating daily reference evapotranspiration in arid and semiarid environments. *Plant Soil Environ*, 57(4), 145-152.

Moriasi, D. N., Arnold, J. G., Liew, M. W. V., Bingner, R. L., Harmel, R. D., and Veith, T. L. (2007). Model evaluation guidelines for systematic quantification of accuracy in watershed simulations. *Transactions Of The ASABE* 50, 885–900.

Pair, C.H. (1970) *Sprinkler Irrigation*. USDA Leaflet No. 476.

Tabari, H., Grismer, M. E., & Trajkovic, S. (2013). Comparative analysis of 31 reference evapotranspiration methods under humid conditions. *Irrigation Science*, 1-11.

Tabari, H., Grismer, M. E., & Trajkovic, S. (2013). Comparative analysis of 31 reference evapotranspiration methods under humid conditions. *Irrigation Science*, 31(2), 107-117.

Willmott, C. J. (1982). Some Comments on the Evaluation of Model Performance. *Bulletin American Meteorological Society* 63, 1309–1313.

Willmott, C. J. (1984). On the evaluation of model performance in physical geography. In *Spatial Statistics and Models*, Gaile GL, Willmott CJ (eds). D. Reidel: Boston. 443–460.

Αλεξανδρής Σ., Σημειώσεις: Γεωπονικό Πανεπιστήμιο Αθηνών, Τμήμα Αξιοποίησης Φυσικών Πόρων και Γεωργικής Μηχανικής.

Λουκάς Α., Σημειώσεις Εργαστήριο Υδρολογίας και Ανάλυσης Υδατικών Συστημάτων, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών.

Ψιλοβίκος Α., (2005). Σημειώσεις Αειφορικής Διαχείρισης Υδατικών Πόρων, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας, Τμήμα Γεωπονίας Ιχθυολογίας & Υδάτινου Περιβάλλοντος.

Ψιλοβίκος Α., (2014). Οικοϋδραυλική. Εκδόσεις Τζιόλα. Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας, Τμήμα Γεωπονίας Ιχθυολογίας & Υδάτινου Περιβάλλοντος.

Ηλεκτρονική Βιβλιογραφία

http1: <http://www.fao.org/land-water/databases-and-software/eto-calculator/en/>

http2: <http://www.fao.org/land-water/databases-and-software/eto-calculator/en/>

http 3: <http://www.fao.org/land-water/databases-and-software/eto-calculator/en/>

http4: <http://www.fao.org/land-water/databases-and-software/eto-calculator/en/>

http5: <http://www.fao.org/land-water/databases-and-software/aquacrop/en/>

http6: <http://www.fao.org/land-water/databases-and-software/aquacrop/en/>

http7: <http://www.fao.org/land-water/databases-and-software/aquacrop/en/>

http8: <http://www.fao.org/land-water/databases-and-software/aquacrop/en/>

http9: <http://www.fao.org/land-water/databases-and-software/aquacrop/en/>

http10: <http://www.fao.org/land-water/databases-and-software/aquacrop/en/>

http11: <http://www.fao.org/land-water/databases-and-software/aquacrop/en/>

http12: <http://www.fao.org/land-water/databases-and-software/aquacrop/en/>

http13: <http://www.fao.org/land-water/databases-and-software/aquacrop/en/>

http14: <http://www.fao.org/land-water/databases-and-software/aquacrop/en/>

http15: <http://www.fao.org/land-water/databases-and-software/aquacrop/en/>

http16: <http://www.fao.org/land-water/databases-and-software/aquacrop/en/>

http17: <http://www.fao.org/land-water/databases-and-software/aquacrop/en/>

http18: <http://www.fao.org/land-water/databases-and-software/aquacrop/en/>

http19: <http://www.fao.org/land-water/databases-and-software/aquacrop/en/>

http20: <http://www.fao.org/land-water/databases-and-software/aquacrop/en/>

http21: <https://www.campbellsci.com/blog/evapotranspiration-101>

http 22: <http://www.gatosseeds.gr/category>

http23: <https://www.google.gr/maps/place/Κυπαρισσία/>

http24: <https://www.climatechwiki.org/content/sprinkler-irrigation>

Abstract

The purpose of this dissertation is the comprehension of the evapotranspiration models with the main objective of the increasing productivity of a crop through the optimal management of irrigation systems. The results of this program were used as inputs to the Aquacrop program which simulates the yield response of herbaceous crops in the water and its particularly suitable for conditions in which the water is the basic limiting factor in cultivation. So, the second part of this dissertation that is based on ETo calculator results and in various biophysical processes, it represents an accurate simulation of yield response in the plant-soil system and the management of irrigation systems. With the help of Aquacrop software four scenarios on irrigation methods, including Drip irrigation and Sprinkler irrigation with or without soil bunds, were used. Finally, a comparison between Drip irrigation and Sprinkler irrigation with and without soil bunds, Sprinkler irrigation with and without soil bunds and Drip irrigation with and without soil bunds, was assessed in order to select the most suitable method for the cultivation of tomato (*Lycopersicon esculentum*).

Keywords Evapotranspiration, Aquacrop, ETo calculator, irrigation systems, Drip irrigation, Sprinkler irrigation